

33-0050/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

AMTLICHE MATERIALPRÜFANSTALT FÜR DAS BAUWESEN

ibmb

TU BRAUNSCHWEIG

**Untersuchungen zum Verbundverhalten
zwischen HGZ-Faserstopfmörtel und Natursteinen**

FORSCHUNGSBERICHT

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

Dipl.-Ing. D. Weiß

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beckroverstraße 12
D-38106 Braunschweig

März 1992

Gefördert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie

Gliederung

1. Situation und Aufgabenstellung
2. Lösungswege
 - 2.1 Stofflich-verarbeitungstechnische Variationen
 - 2.2 Prüftechnische Variationen
 - 2.3 Untersuchungsrichtungen
 - 2.4 Prüfkörperherstellverfahren
 - 2.5 Stofflich-prüftechnische Besonderheiten bei Prüfung der Haftzugfestigkeit
 - 2.6 Abhängigkeit der Verbundfestigkeit vom Wasserrückhaltevermögen des Mörtels
 - 2.7 Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens des Mörtels
3. Ergebnisse der Mörteluntersuchungen
 - 3.1 Ungemagerte bzw. gemagerte HGZ-Faserstopfmörtel
 - 3.1.1 Mechanische Eigenschaften
 - 3.1.2 Hygrische Längenänderung
 - 3.1.2.1 Methode
 - 3.1.2.2 Relative Massenänderung
 - 3.1.2.3 Relative Längenänderung
 - 3.1.3 Zentrische Zugfestigkeit
 - 3.1.4 Wärmedehnkoeffizient
 - 3.1.5 Frostwiderstandsfähigkeit
 - 3.2 Methylcellulose-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel
 - 3.2.1 Mechanische Eigenschaften
 - 3.2.2 Hygrische Längenänderung
 - 3.2.3 Zentrische Zugfestigkeit
 - 3.2.4 Wärmedehnkoeffizient
 - 3.2.5 Frostwiderstandsfähigkeit
 - 3.3 Zentrival FM 20-Mörtel
 - 3.3.1 Mechanische Eigenschaften
 - 3.3.2 Zentrische Zugfestigkeit
 - 3.3.3 Wärmedehnkoeffizient
 - 3.3.4 Frostwiderstandsfähigkeit
 - 3.4 Alternative Verfugmörtel
 - 3.5 Kapillare Wasseraufnahme
 - 3.6 Sorption

- 4. Ergebnisse der Natursteinuntersuchungen
 - 4.1 Verwendete Natursteine und Eigenschaften nach Literaturangaben
 - 4.2 Kapillare Wasseraufnahme
 - 4.3 Wasseraufnahmekoeffizient
 - 4.4 Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und 150 bar
 - 4.5 Hygrische Längenänderung
 - 4.6 Porenradienverteilung
 - 4.7 Spezifische Oberfläche
 - 4.8 Wärmedehnkoeffizient
 - 4.9 Frostwiderstandsfähigkeit
 - 4.10 Sorption
 - 4.11 Vorbefeuchtungsart und Feuchtigkeitsverteilung
- 5. Ergebnisse an Mauerwerks-Versuchswänden
 - 5.1 Herstellung
 - 5.2 Haftzugfestigkeit
- 6. Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen
 - 6.1 HGZ-Faserstopfmörtel
 - 6.1.1 Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.1.2 Elmkalkstein-Prüfkörper
 - 6.1.3 Rüthener Grünsandstein-Prüfkörper
 - 6.1.4 Herdecker Ruhrsandstein- und Velpker Sandstein-Prüfkörper
 - 6.1.5 Haftungsvermittelnde Schlämmen für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.1.6 Polymer-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.1.7 Methylcellulose-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.1.8 Schrumpf- und schwindkompensierte HGZ-Faserstopfmörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.2 Alternative mineralische faserfreie Mörtel
 - 6.2.1 Tubag-Traß-Mörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.2.2 Zentrival-Mörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper
 - 6.2.3 Gemagerter HGZ-Mörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

- 7. Kapillare Aufnahme von Anmachwasser des HGZ-Faserstopfmörtels durch Natursteine
 - 7.1 Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel
 - 7.2 Sander Schilfsandstein und MC-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel
 - 7.3 Rühthener Grünsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel
 - 7.4 Elmkalkstein und HGZ-Faserstopfmörtel

- 8. Unbehinderte thermisch-hygrische Verformung von Doppelstein-Prüfkörpern
 - 8.1 Prüfkörper aus HGZ-Faserstopfmörtel und Schilfsandstein
 - 8.2 Versiegelte Prüfkörper aus HGZ-Faserstopfmörtel und Schilfsandstein
 - 8.3 Prüfkörper aus Zentrival-Mörtel und Schilfsandstein
 - 8.4 Prüfkörper aus MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel und verschiedenen Natursteinen

- 9. Zusammenfassung

- 10. Literaturzusammenstellung

- 11. Anlagen: 94 Stück

1. Situation und Aufgabenstellung

Historische Denkmalbauten aus Natursteinen weisen häufig Mängel auf, die sogar ihre Standsicherheit gefährden können. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Bei gegebenem Anlaß werden in einer Standsicherheitsanalyse baulicher Zustand, Schadensursachen und notwendige Instandsetzungsmaßnahmen eines Objektes erarbeitet. Bevor andere Instandsetzungsmaßnahmen ausgeführt werden können, ist zunächst ein Verdämmen der Mauerwerksschalen durch eine Fugenerneuerung notwendig. In die durch mechanisches Ausräumen bzw. Druckwasserstrahlen von morbidem Altmörtel bis zu etwa 10 cm Tiefe freigeräumten Fugen wird neuer Mörtel eingebracht, wobei seine Verarbeitungstechnik von der Mörtelart mit beeinflußt wird.

Im Mittelpunkt dieser Aufgabe stand die Untersuchung der Verbundfestigkeit - geprüft als Haftzugfestigkeit - zwischen Natursteinen und einem lignocellulosefaserbewehrten Stopfmörtel mit einem alkaliarmen und sulfatisch sowie basisch angeregtem Bindemittel aus vorwiegend Hüttensand sowie einer Sulfat- (Gips oder Anhydrit) und Kalk- (Zement) Komponente, genannt HGZ-Bindemittel, der von der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung (WKI) entwickelt wurde (siehe Anlagen 1 und 2). Flankierende Untersuchungen zum HGZ-Faserstopfmörtel bestanden in der orientierenden Anwendung faserfreier Mörtel aus anderen mineralischem Spezialbindemitteln, mit denen das vom HGZ-Faserstopfmörtel erreichte Festigkeitsniveau bewertet werden sollte. Dieser in zahlreichen Versuchen überprüfte, teilweise auch modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel soll eine akzeptable langzeitbeständige Festigung des historischen Mauerwerks bewirken, das je nach geografischer Lage aus anderen Natursteinarten bestehen kann; außerdem muß dieser Mörtel mit diesen Natursteinen und mit historischem sowie nachgebessertem Mörtel verträglich sein. Neben einer hohen Dauerhaftigkeit sollen ein guter Haftverbund mit verschiedenen Natursteinen, dichte Fugen, eine ausreichende Festigkeit bei niedrigem E-Modul sowie geringe Volumenänderungen bei thermisch-hygrischen Klimawechseln den Mörtel charakterisieren.

Die in diesem Bindemittel chemisch beständige Faser führt zu einer Senkung des E-Moduls, verhindert die Bildung von Mikrorissen infolge hydrations- bzw. klimabedingter Volumenänderungen und kann möglicherweise noch als Wasserdepot für das erhärtende Bindemittel dienen.

Eine begrenzte Modifizierung des HGZ-Mörtels kann z. B. aufgrund stark kapillar saugender Natursteine nicht ausgeschlossen werden. Grundlegende Erkenntnisse zu den Frisch- und Festmörteleigenschaften und den handwerklichen Verarbeitungsbedingungen werden an Laborprüfkörpern gesammelt. Durch ausgewählte Versuche mit Mauerwerkselementen sind diese zu überprüfen. Eine entsprechend geeignete Frischmörtelkonsistenz und Verarbeitungstechnik muß ein sicheres Schließen unterschiedlich breiter Fugen mit vertretbarem Aufwand und mit hoher und konstanter Dichte des Festmörtels gestatten. Der wegen des Faseranteils etwas höhere Wasseranteil darf nicht zu größeren hydrationsbedingten oder hygrischen Volumenänderungen führen, wodurch der Verbund zum Naturstein infolge Flankenablösung beeinträchtigt werden könnte. Die Dauerbeständigkeit des HGZ-Faserstopfmörtels sollte mindestens der herkömmlicher Mörtel entsprechen.

2. Lösungswege

2.1 Stofflich-verarbeitungstechnische Variationen

Die Herstellung des HGZ-Faserstopfmörtels erfolgte in der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung im dort stationierten Zwangsmischer (siehe Anlage 2). Folgende Parameter wurden bei der Versuchsgestaltung berücksichtigt:

Baustoff	Parameter
Naturstein	<ul style="list-style-type: none"> - Natursteinart: anfänglich nur Sander Schilfsandstein, auch wasserstrahlgeschnitten; später zusätzlich: Elmkalkstein Rüthener Grünsandstein Herdecker Ruhrsandstein Velpker Sandstein - Befeuchtungsart: getaucht bzw. kapillar befeuchtet - Befeuchtungsdauer: 10 min; 1 h; 4,5 h und 27 h
Mörtel	<ul style="list-style-type: none"> - Mörtelart: anfänglich nur HGZ-Faserstopfmörtel später zusätzlich: Zentrival FM 10/20-Mörtel (händig bzw. gespritzt) Tubag-Traß-Kalk-Mörtel Tubag-Mörtel für gipshaltiges Mauerwerk HGZ-Mörtel, schwindkompensiert - Bindemittelzusammensetzung (HGZ-Mörtel) - Wasser-Bindemittel-Verhältnis (HGZ-Mörtel) - verschieden modifizierte HGZ-Mörtel: Haftvermittler (Art, Anteil) Methylcellulose (Art, Anteil) Schlämme (Art, Rezeptur) - Mischereinfluß; Stopfperson

2.2 Prüftechnische Variationen

Folgende prüftechnische Parameter und Prüfkörperarten wurden untersucht:

Prüfkörperart	Parameter
Mörtelprismen 4x4x16 cm ³ (händig gestopft bzw. gespritzt)	Prüfung folgender Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> - Biege- und Druckfestigkeit, E_{dyn}; zeit- und klimaabhängig - zentrische Zugfestigkeit, E_{dyn}; zeit- und klimaabhängig - Wärmedehnkoeffizient; zeitabhängig - Schwinden/Quellen (hygrische Längenänderung) - Frostbeständigkeit (manuell bzw. im Zwangsmischer gemischter HGZ-Mörtel, tlw. gemagert und Zentrival FM 20-Mörtel)
Doppelstein-Prüfkörper 10x10x22 cm ³ für Haftzugmessungen	<ul style="list-style-type: none"> - Prüfalter: 7 d; 28 d und 90 d; - Lagerungsklima: 20/65 und 20/99; direkte Einwirkung nach Nachbehandlung bis 7. Tag - Lagerung austrocknungssicher bei 20 °C ohne Zwang; - Lagerung austrocknungssicher bei 20 °C in Stahlform unter Zwang, Fugenbreite wegen lagefixierter Steine unveränderlich;
Mauerwerksversuchselemente 118x90x25 cm ³	natürliches Klima

Zur Beurteilung des Verbundeffektes zwischen Naturstein und Mörtel wurde statt der Haftscherfestigkeit die Haftzugfestigkeit β_{HZ} gewählt, mit der die Verbundfestigkeit unbeeinflusst von Oberflächenrauigkeiten erhalten werden kann (siehe Punkt 2.3). Der Verbund zwischen Stein und Mörtel kann im Doppelstein-Prüfkörper bei Lagerung im Klima 20/65 durch unterschiedlich tief vorgedrunenes Schwinden (Feuchtegradient im Mörtel zwischen Rand und Kern) beeinträchtigt werden. Daher sind nach ersten unbefriedigenden Versuchsergebnissen (siehe Anlage 59) die β_{HZ} -Prüfkörper zur Vermeidung der die Haftzugfestigkeit reduzierenden Schwindspannungen bis zum Prüftag nach 28 Tagen im Folienbeutel und unter Folie im Klima 20/65 gelagert worden (siehe Punkt 2.4).

Bei der Instandsetzung des schadhafte Mauerwerkes bleibt die Lage der Mauersteine sowie die Fugenbreite durch Altmörtel fixiert. Im Unterschied zu neuem Mauerwerk, bei dem jede neue vermörtelte Steinlage als Auflast für darunter liegende Stein-Mörtelschichten wirkt und wo Volumenreduzierungen des Frischmörtels durch "Setzungen" kompensiert werden können, beanspruchen Mörtel-Volumenreduzierungen im Altmauerwerk sofort die Flankenhaftung des Mörtels. Für praxisrelevante Doppelstein-Prüfkörper (simuliertes Altmauerwerk) wird die Lage der Steine so fixiert, daß die Fugenbreite bis zum Prüftag unverändert bleibt. Wegen des Herstelleraufwandes für diese Prüfkörper, aber auch um zuerst die optimale Höhe der Haftzugfestigkeit "unverfälscht" erkennen zu können, wurden viele β_{HZ} -Prüfkörper hochkant stehend zwangfrei gelagert. Mit "interessanten" Mörtelrezepturen, die so hohe β_{HZ} -Werte ergaben, wurden anschließend neue β_{HZ} -Doppelstein-Prüfkörper mit fixierten Steinen bis zur Prüfung in der allseitig geschlossenen Stahlform unter Zwang belassen (siehe Punkt 2.4). Vergleichend war zu erkennen, welche Verbundqualitäten sich unter dem Einfluß beider Lagerungsarten entwickeln können. Zuletzt muß überprüft werden, welche Langzeit-Verbundqualität eingespannte β_{HZ} -Prüfkörper mit ausgewählten Mörteln im trocknenden Klima bzw. im Wechselklima nach mehreren Zyklen entwickeln.

2.3 Untersuchungsrichtungen

Der für Fugenerneuerung geschädigter Mauerwerksschalen einzusetzende Mörtel muß neben einer hohen Langzeitbeständigkeit und Verträglichkeit mit gipshaltigen Altmörteln bzw. zementhaltigen Saniermörteln weiterhin an verschiedenen Natursteinen eine gute Flanken-Haftzugfestigkeit besitzen, die durch Belastungen aus natürlichen thermisch-hygrischen Wechseln kaum reduziert werden darf.

Nach theoretischer Untersuchung wurde als repräsentative Kennzahl für die Verbundqualität zwischen Mörtel und Naturstein die Haftzugfestigkeit β_{HZ} (siehe Anlage 3) festgelegt. Zur Prüfung der Haftscherfestigkeit und dazu wichtige Einflußgrößen gibt es in der Literatur entsprechende Beiträge /1 bis 5/, auch über β_{HZ} -Mindestwerte 28 Tage alter Doppelstein-Prüfkörper mit verschiedenen Mörtelgruppen von $\leq 0,30 \text{ N/mm}^2$ /6; 7/ und zum β_{HZ} -Prüfverfahren /8/. Über die Bestimmung der Haftzugfestigkeit zwischen Natur- bzw. Mauersteinen und Mörtel wurde bisher kaum berichtet. Viele die Haftscherfestigkeit bestimmender Einflüsse gelten auch für die Haftzugfestigkeit (siehe Anlage 4 oder /3;9/); die wichtigsten davon sind:

für Steine: kapillare Wasseransaugeigenschaften (Sauggeschwindigkeit, Saugdauer und Saugkraft); thermisch-hygrische Eigenschaften und Zugfestigkeit; die Mörtelerhärtung beeinflussende Stoffe.

für Mörtel: Verarbeitbarkeit, Homogenität, Plastizität und Verdichtungswilligkeit; Dichtigkeit und mechanische Eigenschaften; Wasserrückhalte- und Haftungsvermögen; Erhärtungsgeschwindigkeit und Luftporenanteil; Verträglichkeit Festmörtel und Altmörtel, thermisch-hygrische Eigenschaften und Flankenhaftung am Stein.

Aus diesen Einflußgrößen ergeben sich wesentliche Untersuchungsrichtungen, deren Ergebnisse schlüssige Erkenntnisse über die unbegrenzte Anwendbarkeit bzw. nur auf bestimmte Natursteinarten beschränkte Eignung des HGZ-Faserstopfmörtels liefern sollen. Sollte durch Klima- und Umweltbelastung ein Abfall der Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Natursteinflanken entstehen, dann würde ein begrenzt modifizierter Mörtel mit hoher Anfangs-Haftzugfestigkeit den Anforderungen eher gerecht werden, weil nach vielen thermisch-hygrischen Zyklen noch eine ausreichend hohe Rest-Haftzugfestigkeit erwartet werden könnte. Somit gewann die Herstellung und Prüfung von Haftzugfestigkeits-Laborprüfkörpern für die Untersuchung der Verbundqualität zwischen HGZ-Faserstopfmörtel und Sander Schilfsandstein als anfänglicher Modell-Naturstein sowie später noch anderen Natursteinen und die Suche nach möglichst hohen β_{HZ} -Werten große Bedeutung. Diese Prüfkörper werden im Punkt 2.4 näher beschrieben.

Das Phänomen der Entstehung konkaver Bereiche auf einer Mörteloberfläche (siehe Punkt 2.5) infolge starken Wasserentzugs durch den Schilfsandstein führte zur Einbeziehung anderer Natursteinarten, zu vielfältiger Modifizierung des HGZ-Faserstopfmörtels (Methylcellulosen und Polymere, Einsatz von Schlämmen) für Schilfsandstein-Prüfkörper und zur vergleichweisen Untersuchung handelsüblicher Trockenmörtel und alternativer Mörtel. Auch wurde die Verteilung des im Schilfsandstein beim Tauchen bzw. kapillarem Befeuchten aufgenommenen Wassers untersucht (siehe Punkt 4.11).

Nach Bestimmung der Haftzugfestigkeit wurden die Mörtelplatten vom Stein abgelöst, Steine und Mörtel beschrieben, fotografiert, die Mörtelplatten auf ihre Ebenheit überprüft sowie Steine und Mörtel getrocknet. An den Mörtelplatten wurde die Dichte und Druckfestigkeit nach der Plattendruckmethode /10/ bestimmt. Für Mörtel der Mörtelgruppe III a beträgt die mittlere Mindestdruckfestigkeit nach dieser Methode 20 N/mm² /10 a/. Zur Beurteilung der von der Mörtelzusammensetzung und Steinart abhängigen Größe und Richtung des Wasserübergangs zwischen Mörtel und Stein wurde an den β_{HZ} -Doppelstein-Prüfkörpern nach ihrer Prüfung eine orientierende Feuchtigkeitsbilanz abgeschätzt (siehe Anlagen 5 und 6) sowie

dieser Wasserübergang in späteren Versuchsreihen an unterschiedlich alten Doppelstein-Prüfkörpern gemessen (siehe Punkt 7).

Die Prüfung der mechanischen und thermisch-hygrischen Mörtelqualität erfolgte an aus gestopften Mörtelplatten trocken ausgesägten $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ großen Prismen. Die an solchen Prismen häufiger bestimmte Festmörtelfestigkeit kann nur eingeschränkt auf die Qualität zwischen Natursteinen erhärteter Mörtelplatten übertragen werden, da wegen des Absaugens eines je nach Natursteinart unterschiedlich großen Anmachwasserteils aus dem plastischen Mörtel die Bindemittelhydratation bei einem verringerten Wasser-Bindemittel-Verhältnis als in nicht saugfähigen Formen erfolgt.

Eine Überprüfung des bei Freilagerung entstehenden natürlichen thermisch-hygrischen Einflusses auf die Verbundqualität zwischen HGZ-Faserstopfmörtel bzw. Zentrival FM 20-Mörtel und Sander Schilfsandstein erfolgte an etwa $0,9 \times 1,2 \text{ m}^2$ großen Mauerwerks-Versuchswänden, aus denen zur Prüfung der Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Naturstein Bohrkerne entnommen wurden.

2.4 Prüfkörperherstellverfahren

Zur Beurteilung der Mörtelqualität dienten $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ große Prismen, die aus $4 \times 17 \times 17 \text{ cm}^3$ großen und 2 Tage alten Mörtelplatten trocken und senkrecht zur Stopfrichtung ausgesägt wurden. Diese Platten wurden in Formen aus Schalungsmaterial mit je 6 entsprechend großen Formungsräumen aus Frischmörtel gestopft. Der als Granalien anfallende HGZ-Faserstopfmörtel wurde anfänglich wegen besserer Handhabung in $3,5 \times 5,0 \times 16,5 \text{ cm}^3$ große Streifen "konstanter" Dichte vorgeformt, die zuerst mit Druckluftstampfer (Stopffläche $3,5 \times 8,0 \text{ cm}^2$, Luftdruck 4 bar; konstante Stopfdauer) bzw. später händig mit Stopfholz (Stopffläche $3,5 \times 4,0 \text{ cm}^2$) und Hammer in die Formräume eingestopft worden sind /11/. Die Nachbehandlung aller dicht in Folienbeuteln eingeschweißten Prismen bei 20°C dauerte bis zum 7. Tag, danach wurden die einzelnen Prismen programmgemäß in die Klimate 20/65, 20/99 bzw. herstellungsfeucht ausgelagert (siehe Punkt 3).

Die zur Beurteilung der Verbundqualität verwendeten etwa 22 cm hohen Doppelstein-Prüfkörper wurden in 4 biegesteifen Stahlformen

für je 6 Prüfkörper hergestellt (siehe Anlagen 7 bis 9). Die Natursteinwürfel wurden vorher durch Tauchen allseitig (entsprechend der Steinbefeuchtung im Mauerwerk bei Fugenberäumung mit Hochdruckwasser) bzw. später nur noch durch kapillares Befeuchten an der Mörtelkontaktfläche unterschiedlich lang befeuchtet. Die dabei aufgenommenen Wassermassen wurden ermittelt. Längs an den mit einer mittigen 2 cm breiten Fuge zum Prüfkörper verlegten zwei 10 x 10 x 10 cm³ großen Natursteinwürfel lagen in Folie gehüllte Trennbleche, so daß jede Fuge einen separaten Formungsraum bildete. Auf die Seitenschalungen jeder Form wurden 2 Balken mit Schraubspindeln und Drucktellern zum Fixieren der einzelnen Steinwürfel angeschraubt. Dazwischen wurde ein "Aufsatzrahmen" über den Fugen befestigt, um so über die Fugentiefe eine möglichst gleichgroße Mörteldichte zu erzielen.

Um die vermutete negative Wirkung einiger Einflußgrößen auf die Haftzugfestigkeit (siehe Punkt 2.5) zu begrenzen, erhärtete der Mörtel vieler späterer Versuchsreihen zwangfrei, in dem nach Stopfende die Form etwas gelockert wurde und die Steine unfixiert blieben. Später wurden jeweils 6 Prüfkörper gleicher Zusammensetzung einmal zwangfrei und andererseits eingespannt bis zur Prüfung gelagert, um den Einfluß der Lagerungsart auf die Haftzugfestigkeit erkennen zu können. Die Formen wurden mit Folie, feuchtem Tuch und Folie abgedeckt. Im Alter von 2 bzw. 4 Tagen sind die Prüfkörper entweder der austrocknungssicheren Form entnommen und gewogen worden sowie bis zum 7. Tag unter Folie bei 20 °C gelagert und anschließend bis zum Prüftag offen im Klima 20/65 oder 20/99 belassen worden bzw. bis zum Prüftag im Folienbeutel bei 20 °C gelagert worden oder die eingespannten Prüfkörper wurden mit geschlossener Form in einen Foliensack eingehüllt und bis zum Prüftag bei 20 °C austrocknungssicher gelagert /11/. Die anfängliche Lagerungsart offen im Klima 20/65 bzw. 20/99 wurde wegen vermutter Beeinflussung von β_{HZ} durch Schwindspannungen vorerst nicht mehr angewendet.

Die Prüfung der Doppelstein-Probekörper auf Haftzugfestigkeit erfolgte mittels 2 Geber dehnungsgesteuert (Dehngeschwindigkeit 0,005 % Fugenbreite pro min) durch zentrischen Zug in einer Zwick-Zugprüfmaschine Typ 1498. Mit 2 stirnseitig an jedem Prüfkörper

angeklebten Zugplatten (mittiges Gewinde M 16) und mit Schraubpaßstücken wurden sie mit der Prüfmaschine gelenkig verbunden. Die Auswertung jeder Prüfung erfolgte mit einem EDV-Programm (Zwick PC-Software Z 7005) hinsichtlich Haftzugfestigkeit, E-Modul, Dehnung und Brucharbeit /11/.

2.5 Stofflich-prüftechnische Besonderheiten bei Prüfung der Haftzugfestigkeit

Orientierende Haftzugfestigkeitsprüfungen nach DIN 18 555 Teil 6 an äußerlich intakten, 28 Tage alten HGZ-Faserstopfmörtel auf Elmkalkstein nach der Prüfung der Haftscherfestigkeit ergaben einen Mittelwert von 1,9 N/mm² aus 9 Einzelwerten /12/. Der Randabstand der freigebohrten Mörtelproben betrug etwa 3 cm.

Für die durchzuführenden β_{HZ} -Prüfungen war Sander-Schilfsandstein als Modell-Naturstein festgelegt worden. Diese Prüfungen erfolgten in Anlehnung an die praktischen Mauerwerksverhältnisse an zentrisch belasteten Prüfkörpern mit mittig zwischen 2 Natursteinwürfeln liegendem Mörtel. Diese praxisrelevante Prüfweise entsprach den Bedingungen in einer Stoßfuge, obwohl diese Ergebnisse wesentlich stärker vom Randeinfluß gestört werden als mittig entnommene Proben nach DIN 18 555. Dieser Randeinfluß entsteht durch randseitige Wasserabgabe und Schwinden des Mörtels sowie mit abnehmender Fugentiefe etwas kleiner werdenden Dichte des eingestopfen Frisch- und auch Festmörtels und damit geringerer Haftzugfestigkeit im Randbereich. An von Schilfsandsteinen nach der Prüfung abgenommenen Mörtelplatten konnten auf einer Oberfläche konkave Einbrüche von $\leq 0,5$ mm Tiefe ab Plattenmitte bis Stopfende und damit Ablösungen vom Stein festgestellt werden, während die andere Oberfläche eben blieb. Die Ebenflächigkeit aller Mörtelplatten wurde mit Haarlineal und Fühlerlehre überprüft. Hauptursachen für dieses Phänomen sind kapillares Saugverhalten der Natursteine, Sauggradient im Naturstein über die Mörtelkontaktfläche entsprechend den Feuchtigkeitsunterschieden durch die Vorbefeuchtung (siehe Punkt 4.11), geringe Erhärtungsgeschwindigkeit des Mörtels und sein Wasseranteil, Wasserrückhaltevermögen des Mörtels sowie der mit abnehmender Stopftiefe geringere Anteil beim Stopfen freigesetztes und vom Stein aufgesaugtes Anmachwasser. Die den

Frischmörtel begrenzenden Steinflächen saugen solange Wasser aus dem noch plastischen Mörtel, bis er erhärtet bzw. sich wegen Volumen- bzw. Dickenreduzierung von einer Steinoberfläche oft mit Reißbildung (an Grenzen in die Fuge eingebrachter Mörtelportionen) ablöste. Die andere im Steinkontakt gewesene Mörteloberfläche blieb eben.

β_{HZ} -Prüfungen erster bis zur Entschalung nach 4 Tagen fest eingespannter Prüfkörper aus HGZ-Faserstopfmörtel und lagefixierter Sander Schilfsandsteine, die dann bis zum Prüftag zwangsfrei gelagert wurden, ergaben wesentlich niedrigere β_{HZ} -Werte als erwartet; als Ursachen dafür gelten (siehe Punkt 6.1.1):

- Störungen durch Hantieren im jungen Alter,
- Schwindspannungen zwischen Mörtel und Naturstein,
- Verbundschwächung infolge Mörtelschrumpfen, wobei die fixierten Steine dieser Volumenreduzierung nicht folgen können,
- Verbundschwächung infolge lokaler Mörtelvolumenreduzierung und Bildung konkaver Bereiche.

Bei einem Versuch wurden die frischen Bruchflächen dieser Prüfkörper wieder verklebt; die folgende β_{HZ} -Prüfung ergab größere Festigkeiten, weil der Bruch nun an den ebenen Mörtelflächen eintrat. Wurde der Zwang nach Stopfende gelöst, blieben diese Unterschiede geringer. Eine Variation des Prüfalters, des Lagerungsklimas und des Mörtel-Bindemittels der Schilfsandstein-Prüfkörper führten kaum zu anderen Ergebnissen; erst eine lange Befeuchtungsdauer der Steine oder die Prüfung von β_{HZ} -Prüfkörpern aus Elmkalk- bzw. Rüthener Grünsandstein ließen erkennen, daß HGZ-Faserstopfmörtel und Natursteine mit geringem kapillaren Saugvermögen bzw. weitgehender Wassersättigung akzeptable Haftzugfestigkeiten ergeben können. Sander Schilfsandstein ist im Kontakt mit HGZ-Faserstopfmörtel als verbundtechnisch problematisch einzuschätzen.

Die für folgende Untersuchungen vorerst angewandte zwangsfreie Lagerung der Prüfkörper in der Form und bis zum Prüftag ergab für verschiedene Mörtel/Stein-Kombinationen typische Haftzugfestigkeiten "frei" von Störgrößen, obwohl diese Ergebnisse nicht immer praxisrelevant sind. Festigkeitsmäßig günstige Mörtel/Stein-Kombinationen wurden anschließend bis zum Prüftag "unter Zwang" wie im

Mauerwerk belassen, um so den Einfluß der Volumenänderungen der Mörtel durch Schrumpfen und Wasserverlust sowie der Steine durch Quellung infolge Wasseraufnahme auf die Haftzugfestigkeit entsprechender Prüfkörper erkennen zu können. Die beste Näherung an praxisrelevante Verhältnisse stellt die Lagerung entsprechender Prüfkörper "unter Zwang" offen im Klima 20/65, im zyklischen Wechselklima bzw. im Freien dar, deren Ergebnisse besonders für den in der Fuge außen liegenden Mörtelbereich gelten dürfte.

2.6 Abhängigkeit der Verbundfestigkeit vom Wasserrückhaltevermögen des Mörtels

Das Absaugen eines Teils des Mörtelanmachwassers durch den Naturstein infolge seiner Kapillarität kann die Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Naturstein entscheidend beeinflussen. Erstmals wurde dieses Problem bei Anwendung von verzögertem Werk-Frischmörtel für Kalksandstein-Mauerwerk erkannt und in der Literatur gezielt bzw. abstrahierend beschrieben /1 - 5, 13/.

Natursteine sind zufällig und abhängig von geochemischen, -physikalischen und diagenetischen Bedingungen entstanden, so daß ihre mechanischen und hygrischen Eigenschaften unterschiedlich schwanken können, wobei z. B. die Porositätsstreuungen innerhalb einer Sandsteinart so groß wie zwischen verschiedenen Sandsteinarten sein können /14/. Wegen unterschiedlicher Kapillarität der Natursteine, die bestimmt wird vom Anteil der Kapillarporen bzw. von der Porenradienverteilung und die sich in verschiedener Sauggeschwindigkeit, -dauer und -kraft sowie zeitlicher Konstanz äußert, wird aus dem anliegenden Frischmörtel unterschiedlich viel Anmachwasser abgesaugt. Diese Menge hängt ab von der Natursteinart, dem während der Vorbefeuchtung aufgenommenen Wasseranteil und seiner Ausbreitgeschwindigkeit im trockenen Steinvolumen, dem Wasseranteil, Beginn und Ablauf der Bindemittelhydratation sowie dem Wasserrückhaltevermögen des Frischmörtels und der Porenstruktur und Porosität des erhärtenden Mörtels. Diese komplexen Vorgänge führen dazu, daß Steine mit vielen feinen Kapillarporen z. B. Kalksandsteine und Sander Schilfsandsteine (siehe Punkt 4.6) dem Mörtel länger und mehr Wasser entziehen als Steine mit weniger oder größeren Kapillarporen bzw. wassergesättigte Steine. Die langsamere

Mörtelerhärtung eines verzögerten Werk-Frischmörtels bzw. des HGZ-Faserstopfmörtels (Verarbeitungsdauer ≤ 36 h bzw. ≥ 12 h) kann zu einem so großen Wasserverlust führen, daß für die später einsetzende BM-Hydratation Wasser zur optimalen Erhärtung und Eigenschaftsbildung fehlt und Erhärtungsstörungen auftreten. Durch längere Vorbefeuchtung kann bei Laborversuchen dem Stein so viel Wasser angeboten werden, daß im Mörtel noch ausreichend viel Wasser verbleibt, doch hat das praktische Grenzen. Daher sollte in diesem Fall das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels dem Saugbestreben des Natursteins angepaßt werden.

Ein begrenzter Wasserverlust des Mörtels kann positiv wirken, da er aus verarbeitungstechnischen Gründen mehr Wasser enthält, als für seine 100%ige Erhärtung erforderlich ist und sich viele Eigenschaften mit abnehmendem Wasser-BM-Verhältnis verbessern, wobei eine kontinuierlichere Verdichtung des vom Wasser freigegebenen Porenraumes erforderlich ist.

Bei der Abgabe von Wasser an den Naturstein reduzieren sich Masse und infolge der Kohäsion das Volumen des Mörtels. Konkave Bereiche in einer Haftfläche des Mörtels (siehe Punkt 2.5) wurden bisher nicht beobachtet bzw. nicht beschrieben; sie könnten aber auch nur eine für Doppelstein-Prüfkörper typische Erscheinung darstellen: Bei ihrer Herstellung sind 3 Außenflächen außer der, von der aus die Fuge gestopft wurde, gegen den Luftdruck relativ dicht abgeschirmt. Der Wassertransport zum Stein dürfte enden, wenn im Mörtel ebenfalls ein Unterdruck gleich dem kapillaren Saugdruck entsteht, wozu aber eine allseitige Abschirmung erforderlich wäre. Über die eine "freie" Prüfkörperfläche kann aber immer ein Druckausgleich mit dem naheliegenden Mörtel eintreten, so daß hier mehr Wasser vom Stein abgesaugt werden könnte. Die Lage konkaver Bereiche zwischen Fugenmitte und Stopfende bestätigt diese Annahme. Die Haftfläche wird um diese einseitig auftretenden "Vertiefungen" reduziert und damit die Verbundfestigkeit.

Eine günstige Verbundfestigkeit kann dann erzielt werden, wenn der Mörtel neben geeigneter Erhärtungsgeschwindigkeit, Dichte und Festigkeit nur sehr feine Luftporen wegen der Haftflächenminimierung /1/ und ein hohes Wasserrückhaltevermögen (WRV) durch entsprechende Ausgangsstoffe, Zusammensetzung bzw. Zusätze besitzt und

wenn vorbefeuchtete Natursteine mit geringerer Kapillarität, jedoch mit gewisser Porosität verwendet werden. Bei verzögertem Werk-Frischmörtel konnten durch Verbesserung des WRV Verbundschäden durch "Verdursten" oder "Verbrennen" des Mörtels im Zusammenhang mit Kalksandsteinen vermieden werden /2, 13/.

2.7 Verbesserung des Wasserrückhaltevermögens des Mörtels

Detailangaben zur Verbesserung des WRV von Mörtel fehlen in der Literatur. Als Zusätze eignen sich u. a. Stärke, Methylcellulosen, Pflanzenschleime und Polyamine /15/, Cellulosefasern oder Luftporenbildner wegen der Unterbrechung der Kapillarporen. Damit wird die Porenstruktur des Mörtels für kapillaren Wassertransport verschlechtert oder Wasser zur Bildung kolloider Sole bzw. Gele verwendet und so seine Beweglichkeit vermindert. Für die Prüfung der WRV-Verbesserung nach DIN 18 555 Teil 7 (Meßdauer 5 min) dient ein bestimmter Karton. Es bleibt unklar, ob damit die extreme Kapillarität bestimmter Natursteine simuliert werden kann. Die Bindung des Wassers an o. g. Stoffe darf nur physikalisch sein, da das Wasser für Hydratationsreaktionen verfügbar bleiben soll, so daß die Wirksamkeit der Zusätze auch von der Kapillarität der Natursteine abhängt.

Es wurden verschiedene Methylcellulosen untersucht (siehe Punkt 6.1.7). Mit einigen konnte die Haftzugfestigkeit erhöht werden. Diese Verbesserung beruhte offenbar nur teilweise auf einer Erhöhung der Wasserrückhaltung im Mörtel, denn gemäß Feuchtheitsbilanz entnahmen Sander Schilfsandsteine trotzdem noch größere Wassermengen aus dem Mörtel, was auch durch Wasserübergangsversuche bestätigt wurde (siehe Punkt 7). Diese positive Wirksamkeit beruht vermutlich auch auf einem Klebeeffekt, der trotz hoher Prüffeuchtigkeit der Doppelstein-Proben eintrat.

Durch Methylcellulose (MC) wird die Konsistenz, die Plastifizierung, das WRV und die Haftung des Mörtels positiv beeinflusst /16/. Der notwendige MC-Anteil hängt ab von der Saugfähigkeit des Untergrundes, der Schichtdicke des Mörtels und seiner Zusammensetzung. Das WRV der MC-Type wird von der Viskositätsstufe, der Korngröße, der Lösezeit, der Mörteltemperatur und der Zugabemenge bestimmt.

Je nach Mischdauer und -intensität können im Mörtel zusätzlich je nach MC-Type ≤ 30 Vol.-% Luftporen entstehen. Höhere Zusätze niedrigviskoser MC verbessern die Haftung deutlicher als niedrige Zusätze hochviskoser MC-Typen. Durch Polyvinylacetat-Zusatz erhöht sich die Haftung weiterhin.

MC-haltige Mörtel sind bei höherer Temperatur niedrigviskoser als nach der Auskühlung; dann tritt erneutes Lösen der MC ein. Erhöht sich die Temperatur über $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, dann ist mit Thermokoagulation zu rechnen. Mit steigendem Salzgehalt (ein- und zweiwertige Ionen) reduziert sich die Löslichkeit der MC und die Koagulationstemperatur tritt früher ein (z. B. Senkung um $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch 1 M.-% Ca SO_4); bei pH-Werten > 7 werden aber die Lösezeiten kürzer. Da im HGZ-Faserstopfmörtel für beide Vorgänge Voraussetzungen vorliegen, außerdem tritt beim Zwangsmischen des Mörtels kurzzeitig eine Mörteltemperatur von etwa 40 bis $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf, kann die MC-Wirksamkeit nur im Versuch überprüft werden, wobei anfänglich mit geringerer Wirksamkeit zu rechnen ist. Zementhaltige Mörtel bzw. Gipsmörtel werden durch MC-Typen verzögert, so daß ein Beschleunigerzusatz empfehlenswert ist /16/.

Zur Verbesserung des WRV des HGZ-Faserstopfmörtels wurden folgende Zusätze orientierend untersucht: Addiment Stabilisierer ST 2 sowie Methylcellulosen der Firmen Wolff, Walsrode und Hoechst AG, Frankfurt.

3. Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

Zur Erarbeitung mörtelspezifischer Kenndaten des HGZ-Faserstopfmörtels wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, wobei sich die Eigenschaften in Formen erhärteter Mörtel von denen zwischen Natursteinen erhärteter unterscheiden werden. Bei der Versuchsdurchführung wurden die Arbeiten von Knöfel und Schubert /17/ sowie von Wöhl und Riechers /10/ berücksichtigt. Die nach /18/ bestimmten Plattendruckfestigkeiten der Mörtel gestatten nur Vergleiche untereinander, für ein Umrechnen auf Prismendruckfestigkeit fehlen notwendige Erfahrungen. Diese Plattendruckfestigkeiten werden im Kapitel 6 mit den Haftzugfestigkeiten besprochen.

Untersucht wurden gemagerte HGZ-Faserstopfmörtel, nicht gemagerte HGZ-Faserstopfmörtel, MC-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel, Zentral FM 20-Mörtel sowie einige alternative Mörtel. Die Herstellung der Prismen erfolgte meist aus in Schalmaterialformen gefertigten Mörtelplatten (siehe Punkte 2.4) und selten in Stahlformen.

3.1 Ungemagerte bzw. gemagerte HGZ-Faserstopfmörtel

Der zur Herstellung der Mörtelplatten verwendete HGZ-Faserstopfmörtel wurde anfänglich nach einem Streuverfahren aus Trockenmörtel und aufgesprühtem Wasser schichtweise und gravimetrisch bzw. später im Zwangsmischer erzeugt. Die Ergebnisse enthalten die Anlagen 10 bis 18.

3.1.1 Mechanische Eigenschaften

Die Rohdichte in Folie eingeklebter Prismen aus ungemagertem bzw. gemagertem Mörtel mit etwa $1,63 \text{ kg/dm}^3$ bzw. $1,87 \text{ kg/dm}^3$ blieb bis zum 180. Tag unverändert, während sie bei entsprechenden im Klima 20/65 offen gelagerten Prismen auf $1,37 \text{ kg/dm}^3$ bzw. $1,67 \text{ kg/dm}^3$ nach 180 Tagen gefallen war. Die Biegezugfestigkeit ungemagerter Mörtelprismen war grundsätzlich etwas höher als die gemagerter, sie erhöhte sich zeitabhängig und betrug nach 180 Tagen in 20/65 etwa 5 N/mm^2 (siehe Anlage 10). In Folie gelagerte Prismen waren grundsätzlich etwas biegezugfester als offen in 20/65 gelagerte. Die Druckfestigkeit ungemagerter Prismen war um höchstens 2 N/mm^2 größer als die gemagerter Mörtelprismen; in Folie gelagerte Prismen waren oft etwas fester. Nach 180 Tagen lag die Druckfestigkeit für beide Lagerungs- und Mörtelarten zwischen 15 und 20 N/mm^2 , was einer Festigkeit der Mörtelgruppe II entsprach.

Der dynamische Elastizitätsmodul ungemagerter Prismen betrug nach 28 Tagen bei Folienlagerung etwa 10800 N/mm^2 und im Klima 20/65 8400 N/mm^2 ; auf Längenänderung geprüfte getrocknete Prismen besaßen einen E_{dyn} von 7900 N/mm^2 .

Für gemagerte Prismen wurde nach 28 Tagen ein E_{dyn} nach Folienlagerung von 17400 N/mm^2 und nach Lagerung in 20/65 von 14000 N/mm^2 gemessen; beide Mittelwerte waren deutlich größer als die für ungemagerte Prismen bestimmten. An entsprechenden Längenänderungsprismen betrug er $\leq 10600 \text{ N/mm}^2$ (siehe Anlagen 10 und 17).

Die Prüffeuchtigkeit ungemagerter Prismen betrug bei Folienlagerung für alle Prüftermine etwa 28 M.-%; durch Herstellung und Zuschnitt hatte sie sich von rechnerisch 47 M.-% auf diesen Wert reduziert. Nach 180 Tagen lag die Feuchtigkeit in 20/65 frei gelagerter ungemagerter Mörtelprismen bei 5,8 M.-%. Bei gemagerten Prismen wurde für Folienlagerung eine konstante Prüffeuchtigkeit von etwa 15 M.-% (ursprünglich 33,5 M.-%) bzw. bei in 20/65 freigelagerten nach 180 Tagen von etwa 3 M.-% bestimmt.

Ergänzend dazu wurden während der Herstellung der ersten 80 Doppelsteinprüfkörper nochmals 5 Serien ungemagerter Prismen aus zwangsgemischtem HGZ-Faserstopfmörtel (HGZ - BM: 85/10 /5 oder 78/ 15/7; $W = 0,5$; $x_F = 0,05$) hinsichtlich ihrer Festigkeiten nach verschiedenen Alter und Lagerungsarten untersucht (siehe Anlage 11). Der im Zwangsmischer hergestellte Mörtel ergab um $\leq 1 \text{ N/mm}^2$ höhere Biegezugfestigkeiten von 6 bis 7 N/mm^2 . Die Druckfestigkeit war bei herstellungfeuchter bzw. offener Lagerung in 20/65 nach 7, 28 und 90 Tagen um etwa 5 N/mm^2 höher und erreichte Werte zwischen 20 und 25 N/mm^2 . Nach 7 Tagen (Ende Nachbehandlung) hatten alle Mörtel 90 % bzw. 75 ... 80 % der Biegezug- bzw. Druckfestigkeit nach 28-Tagen erreicht. Die Prismen der BM-Rezeptur 85/10/5 besaßen eine gering niedrigere Biegezugfestigkeit und eine um etwa 4 N/mm^2 niedrigere Druckfestigkeit als Prismen der BM-Rezeptur 78/15/7, d. h. Mörtel letzterer Rezeptur erhärtete schneller wegen intensiverer Anregung. Da er aber zur Gipsausblühung neigen soll, wurde die BM-Rezeptur 78/15/7 später nicht mehr verwendet.

Für bei 60°C getrocknete Mörtelprismen beider HGZ-Rezepturen ergaben sich an 3 Prüfterminen Biegezugfestigkeitsabnahmen von etwa 30 ... 40 %, verglichen mit den Werten bei herstellungsfeuchter Lagerung. Die Druckfestigkeiten erhöhten sich dagegen um 10 N/mm^2 (7 d, 28 d) auf Werte von 25 bis 30 N/mm^2 , bezogen auf den herstellungsfeuchten Zustand. Wurden die Mörtelprismen offen im Klima

20/65 gelagert, dann betrug die Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen nur 50 bis 60 % und nach 90 Tagen nur 75 % der Werte herstellfeuchter Prismen und erreichte nicht die Werte getrockneter Prismen. Dagegen unterschieden sich die Druckfestigkeiten in 20/65 oder 20/99 gelagerter Mörtelprismen kaum.

Eine offene Lagerung der Mörtelprismen im Feuchtklima 20/99 führte zu gleichen Biegezug- bzw. Druckfestigkeiten wie bei herstellungsfeucht gelagerten Prismen. Die Mörtelprismen erreichten nach 90 Tagen eine Biegezugfestigkeit von 6 N/mm² (85/10/5) bzw. 7 N/mm² (78/15/7) im herstellungsfeuchten bzw. im Klima 20/99 oder von knapp 5 N/mm² im Klima 20/65. Die Druckfestigkeit in beiden Klimaten gelagerter Prismen betrug etwa 25 N/mm² und nach Trocknung etwa 30 N/mm² (siehe Anlage 11). Bei einem Wasser-Bindemittel-Wert $W = 0,4$ werden alle Festigkeiten wegen höherer Dichte etwas ansteigen. Solche Prüfungen wurden nicht durchgeführt, weil die realen Festigkeiten des HGZ-Faserstopfmörtels zwischen Natursteinen auch damit unbekannt bleiben.

3.1.2 Hygrische Längenänderung

3.1.2.1 Methode

Die aus maschinell gestopften Mörtelplatten von 17 x 17 x 4 cm³ senkrecht zur Stopfrichtung trocken ausgeschnittenen Prismen von 4 x 4 x 16 cm³ wurden stirnseitig mit Meßzapfen (Form AB DIN 52 450) beklebt und im Klima 20/65 bis zur Massenkonzanz sowie nach 17tägiger Wasserlagerung erneut in 20/65 bis zur Massenkonzanz gelagert. Je 8 gemagerte bzw. ungemagerte Prismen (Rezepturdaten siehe Anlage 10) wurden in 2 Gruppen gemessen und die mittleren Massen- und Längenänderung dargestellt (siehe Anlagen 12 bis 15). Folgende Bezugswerte galten für die Berechnung der relativen Änderungen: der Anfangswert für die 1. Schwindphase, Endwert 1. Schwindphase für Quellen und Endwert Quellen für 2. Schwindphase (siehe Anlagen 12 und 13).

Um die Änderungen während der 1. Schwindphase mit denen der 2. Schwindphase vergleichen zu können, wurde der Endwert der 1. Schwindphase in einer 2. Darstellung (siehe Anlagen 14 und 15) als Bezugswert für alle Meßwerte der Massen- und Längenänderung verwendet. Zur Bestimmung der Prismenlängen diente das Meßgerät A nach DIN 52 450.

3.1.2.2 Relative Massenänderung

Die Massenänderungs-Mittelwerte beider je 4 gemagerte bzw. ungemagerte Mörtelprismen umfassende Gruppen unterschieden sich nicht (siehe Anlage 12). Folgende Ergebnisse werden ermittelt:

P r ü f u n g		gemittelte Massenänderung in M.-%	
		gemagerte Mörtelprismen	ungemagerte Mörtelprismen
Erste Schwindphase	nach Anlage 12	- 11,0	- 15,0
	nach Anlage 14	- 12,1	- 17,5
Quellphase	nach Anlage 12	+ 15,5	+ 23,5
	nach Anlage 14	+ 15,4	+ 23,3
Zweite Schwindphase	nach Anlage 12	- 14,1	- 19,8
	nach Anlage 14	- 16,2	- 24,4

Die hygrisch bedingte Massenänderung gemagerter Mörtelprismen blieb wegen ihres geringeren Wasseranteils bei allen Prüfphasen kleiner als die ungemagerter Mörtelprismen. Offenbar wegen Ersatz bis Meßbeginn ausgetrockneter Feuchtigkeit und Füllen von Luftporen überstieg die Feuchtigkeit der Prismen beider Rezeptvarianten nach der Wasserlagerung die bei Meßbeginn.

Auf Anlage 12 sind die Prüfergebnisse auf in 3.1.2.1 genannte, verschiedene Bezugswerte dargestellt. Die Wiedergabe der Ergebnisse für Prismen je einer Gruppe, nur bezogen auf den jeweiligen Endwert der 1. Schwindphase, enthält Anlage 14. Wegen der verschieden großen Bezugswerte unterscheiden sich die Ergebnisse etwas. Wegen höherer Masseaufnahmen während der Quellphase sind die Massenabgaben während der 2. Schwindphase für Prismen beider Mörtelarten größer, ihre Massen waren nach Abschluß dieser Messungen höchstens um 1 M.-% kleiner als die nach Ende der 1. Schwindphase. Während der Quellphase wurde kein zusätzliches Wasser chemisch gebunden; die aufgenommenen Wassermengen trockneten im Klima 20/65 wieder aus. Die maximale Massenänderung klimatisierter, ungemagerter bzw. gemagerter Mörtelprismen betrug nach Wasserlagerung und Rückklimatisierung in 20/65 etwa 25 % bzw. 16 %.

3.1.2.3 Relative Längenänderung

Die entsprechenden zeit- und klimaabhängigen Meßergebnisse sind auf den Anlagen 13 und 15 dargestellt. Die Längenänderungsmittelwerte der je 2 Gruppen aus jeweils 4 gemagerten bzw. ungemagerten Mörtelprismen stimmten für jede Rezeptvariante gut untereinander überein. Im einzelnen ergaben sich folgende gemittelte Endwerte:

P r ü f u n g	gemittelte Längenänderung in mm/m	
	gemagerte Mörtelprismen	ungemagerte Mörtelprismen
Erste Schwindphase (Bezugswert Ausgangslänge)	- 1,88	- 2,82
Quellphase (Bezugswert Endwert 1. Schwindphase)	+ 0,48	+ 1,12
Zweite Schwindphase (Bezugswert Endwert Quellen)	- 0,64	- 1,73

Bei allen 3 Teilprüfungen waren die geringeren mittleren Längenänderungen gemagerter Mörtelprismen vergleichsweise zu ungemagerten sehr deutlich. Trotz der hohen, den Feuchtigkeitszustand bei Meßbeginn übersteigenden Wasseraufnahme der Prismen beider Rezeptvarianten während der 17tägigen Wasserlagerung (siehe Anlagen 12 und 14) blieben die mittleren Quellwerte deutlich kleiner als die mittleren Ergebnisse der ersten Schwindphase. Auch die Schwindwerte der wassergelagerten gemagerten bzw. ungemagerten Mörtelprismen waren bei Rückklimatisierung in 20/65, bezogen auf den "Endwert Quellen", geringer als die Ergebnisse der 1. Schwindphase. Werden jedoch die Teilergebnisse addiert, dann ergab sich nach der 2. Schwindphase im Vergleich zur ersten eine Vergrößerung des Schwindens um 0,16 mm/m bzw. 0,61 mm/m für gemagerte bzw. ungemagerte Mörtelprismen, auch weil bei Beginn der Wasserlagerung die 1. Schwindphase noch nicht beendet war.

Die in obiger Tabelle genannten Längenänderungen ergaben sich auch, wurden die Meßwerte von je 4 gemagerten bzw. ungemagerten Mörtelprismen nur auf einen Bezugswert (Endwert 1. Schwindphase) bezogen (siehe Anlage 15). Trotz eingetretener Massenkonzanz war noch keine völlige Konstanz der Längenänderung der 1. Schwindphase

erreicht. Die Endwerte der 2. Schwindphase für gemagerte bzw. ungemagerte Mörtelprismen unterschritten die Endwerte der 1. Schwindphase entsprechend den Massenänderungsunterschieden um etwa 0,2 mm/m bzw. 0,6 mm/m.

Wegen der sehr großen Erstschwindung ergaben sich nach Quellphase und Zweitschwindung Gesamtschwindwerte von 3,5 mm/m bzw. 2,0 mm/m für ungemagerte bzw. gemagerte Prismen. Ziel weiterer Rezepturoptimierungen muß es auch sein, die im Vergleich zur Zweitschwindung gleiche oder größere Erstschwindung durch z. B. niedrigeren Wasser-Bindemittel-Wert zu verkleinern.

3.1.3 Zentrische Zugfestigkeit

Die zentrische Zugfestigkeit von Prismen aus gemagertem bzw. ungemagertem HGZ-Faserstopfmörtel, die Bruchdehnung, der dynamische E-Modul und die Druckfestigkeit enthält Anlage 16.

Die Rohdichten der offen im Klima 20/65 gelagerten bzw. in Aluminiumfolie eingeklebten Prismen entsprachen denen der auf Festigkeit geprüften Prismen (siehe Anlage 10). Die zentrische Zugfestigkeit herstellungsfeuchter Prismen betrug $\leq 2,3 \text{ N/mm}^2$; bei den offen im Klima 20/65 gelagerten Mörtelprismen war sie nach 280 Tagen nur halb so groß. Unterschiede zwischen gemagertem und ungemagertem Mörtel waren nicht festzustellen. Dagegen war die Bruchdehnung ungemagerter Mörtelprismen für beide Lagerungsarten etwa um 50 % größer als die gemagerter. Der dynamische E-Modul gemagerter Mörtelprismen war um reichlich 50 % größer als der ungemagerter Prismen (Folienlagerung); dieser Unterschied war bei gleicher Tendenz für offen gelagerte Prismen noch etwas größer. Diese Ergebnisse entsprachen denen an Festigkeitsproben erhaltenen (siehe Anlage 10).

Die Druckfestigkeiten in Folie gelagerter Prismen beider Lagerungsarten erhöhten sich mit zunehmendem Alter, sie waren etwas höher als die der Festigkeitsproben (siehe Anlagen 10 und 16). Die Verringerung der Druckfestigkeit der Prismen beider Lagerungen im Klima 20/65 vom 55. Tag bis zum 280. Tag entstand vermutlich durch Eigenschaftsstreuungen und weniger durch Umkristallation¹⁵⁾ wegen Wasserdefizits.

3.1.4 Wärmedehnkoeffizient

Die Ergebnisse der Bestimmung des Wärmedehnkoeffizienten von ungemagertem bzw. gemagertem HGZ-Faserstopfmörtel sind auf Anlage 17 angegeben; die Bestimmung erfolgte nach der in /11/ beschriebenen Methode. Der Wärmedehnkoeffizient war für ungemagerten bzw. gemagerten HGZ-Faserstopfmörtel etwa gleich groß und betrug 9 bis $10 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} \cdot \text{K}^{-1}$. Eine sichere Abhängigkeit vom Mörtelalter konnte nicht festgestellt werden. Für den Wärmedehnkoeffizient von Sandsteinen wird ein Wert von 7 bis $12 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} \cdot \text{K}^{-1}$ /14/ genannt. Somit kann davon ausgegangen werden, daß die Wärmedehnkoeffizienten von HGZ-Faserstopfmörtel und von Natursteinen etwa gleich groß sind.

3.1.5 Frostwiderstandsfähigkeit

Die Prüfung auf Frostwiderstandsfähigkeit erfolgte nach der in /11/ beschriebenen Methode, die Ergebnisse wurden auf Anlage 18 angegeben. Nach 15 Frost-Tau-Wechseln waren an den Prismen keine Risse oder Abplatzungen festzustellen, die Differenzen zwischen den Massen gemagerter Proben vorher und nachher betrugen + 0,5 g, was etwa 0,2 %, bezogen auf die Ausgangsmassen, bedeutet.

Die Druckfestigkeiten der FTW-Prismen beider Rezepturvarianten unterschieden sich nicht von denen entsprechender Vergleichs-Probekörper, sie waren für die gemagerten Mörtelprismen etwas niedriger als für die ungemagerten. Diese Tendenz zeigte sich bereits an den Festigkeitsprobekörpern (siehe Anlage 10).

3.2 Methylcellulose-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel

Die Haftzugfestigkeit von Doppelsteinprobekörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel erreichte erst dann Werte von $> 0,5 \text{ N/mm}^2$, nachdem der Mörtel mit Methylcellulose modifiziert worden war (siehe Punkt 6.1.7). Da neben Sander Schilfsandstein möglicherweise noch weitere Natursteine mit normalem HGZ-Faserstopfmörtel keinen befriedigenden Verbund entwickeln könnten, dürfte modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel bei zukünftigen Pilotobjekten eine größere Bedeutung erlangen; deshalb wurde er mörteltechnologisch überprüft. Die Mörtelzusammensetzung betrug: HGZ-Bindemittel 85/10/5, $x_F = 0,05$, $x_S = 0$, $x_{MC} = 0,0026$; $W = 0,4$.

Dieser im Zwangsmischer erzeugte Mörtel besaß eine kittähnliche Konsistenz.

3.2.1 Mechanische Eigenschaften

Die Ergebnisse wurden auf Anlage 19 dargestellt. Folgende Lagerungsarten wurden gewählt: herstellungsfeucht in Folie eingeschweißt; herstellungsfeucht in Folie eingeschweißt, am Prüftag bei 60 °C getrocknet; Klima 20/65 und Klima 20/99, jeweils ohne Folienabdeckung ("offen") und Wasserlagerung. Die Nachbehandlung dauerte bis zum 7. Tag; die Proben waren in Folienbeuteln eingeschweißt. Ab 8. Tag begann die offene Lagerung in 20/65 bzw. 20/99 oder in Wasser. Die Prüftermine betrugen 7, 28, 90 und 180 Tage.

Die Trockenrohdichte aller Prüfkörper lag bei 1,48 kg/dm³. Der dynamische E-Modul betrug bei feuchten Prüfkörpern meist ≥ 15000 N/mm²; er nahm zeitabhängig besonders bei diesen um mindestens 2000 N/mm² zwischen dem 7. Tag und dem 180. Tag zu. An im Klima 20/65 gelagerten Mörtelprismen war er gering niedriger; nach Trocknung verringerte er sich auf ≤ 11000 N/mm². Der dynamische E-Modul dieses Faserstopfmörtels war geringfügig größer als der des unmodifizierten HGZ-Faserstopfmörtels; er entsprach etwa dem des gemagerten HGZ-Faserstopfmörtels (siehe Anlage 10).

Die Biegezugfestigkeit betrug im Mittel 6,5 N/mm². Der Einfluß verschiedener Feuchtlagerungen war gering, obwohl vermutlich das Klima 20/99 zu den höchsten Werten führen dürfte. Diese Festigkeitswerte waren noch etwas höher als die des ungemagerten HGZ-Faserstopfmörtels (BM: 78/15/7, W = 0,5) im Klima 20/99 (siehe Anlage 10). Der β_{BZ} -Verlust bei Trocknung blieb bei MC-Modifizierung geringer. Die Biegezugfestigkeit der im Klima 20/65 gelagerten Prismen war etwa um 0,5 N/mm² kleiner als die bei Feuchtklimalagerung.

Die Druckfestigkeit erhöhte sich zeitabhängig bis zum 90. bzw. 180. Tag; nach 28 Tagen betrug sie unabhängig von der Lagerungsart ≥ 30 N/mm² und war nach 90 Tagen um etwa 10 N/mm² größer als die des nicht modifizierten Mörtels, dessen Wasser-Bindemittelwert aber noch 0,5 betrug. Eine gesicherte Abhängigkeit der Festigkeit von der Lagerungsart war kaum zu erkennen. Die Druckfestigkeit in

20/99 bzw. in Wasser gelagerter Prismen betrug etwa $\geq 34 \text{ N/mm}^2$ und in 20/65 oder herstellungsfeucht gelagerter bzw. getrockneter Prismen etwa 40 N/mm^2 .

3.2.2 Hygrische Längenänderung

Gemäß Untersuchungsprogramm wurden 6 MC-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtelprismen nach einer 1. Schwindphase einer Quell- und einer weiteren Schwindphase ausgesetzt, um festzustellen, ob durch diese Modifizierung u. a. ein Rest-Schwindmaß gegenüber der vorherigen Schwindphase eintritt. Auf die Stirnseiten der bis zum 7. Tag nachbehandelten Prismen wurden Meßzapfen (Form AB, DIN 52450) aufgeklebt. Die Erstmessung erfolgte am 8. Tag. Wöchentlich einmal wurden die Massen und Längen der im Klima 20/65 bzw. in Wasser gelagerten Prismen jeweils bis zum Eintritt eines Beharrungszustandes bestimmt (siehe Anlagen 19 a und 19 b).

Folgende Ergebnisse wurden festgestellt:

Behandlungsart	Meßdauer	gemittelte ¹⁾ Massenänderung	gemittelte ¹⁾ Längenänderung (n = 6)
-	Wochen	M.-%	mm/m
1. Schwind- phase Klima 20/65	21	10,9	4,56 V = 5,1 %
1. Quellphase (Wasserlage- rung)	14	15,7	4,31 V = 15,7 %
2. Schwind- phase Klima 20/65	18 41	9,3 9,8	2,13 (V = 30,1 %) 2,48 (V = 36,1 %)

¹⁾ Bezugswert: Ende 1. Schwindphase

Im Vergleich mit der gemittelten Längenänderung ungemagerter HGZ-Faserstopfmörtelprismen ($W = 0,5$) sind das mittlere 1. Schwindmaß bzw. Quellmaß dieses MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels fast doppelt bzw. dreifach so groß wie jene. Das bei der abschließenden 2. Schwindphase nach 18 bzw. 41 Wochen bestimmte Endschwindmaß

betrug jedoch nur 2,1 mm/m bzw. 2,5 mm/m; es war somit nur halb so groß wie das der 1. Schwindphase. Trotz einer Wasseraufnahme bei der Quellphase über den Zustand bei Beginn der Schwindmessungen wegen Wasserfüllung herstellbedingter Luftporen blieb bei der 2. Schwindphase der im Klima 20/65 wieder austrockenbare Wasseranteil geringer als der vorher aufgenommene. Während der 105 Tage dauernden Quellphase hat offenbar eine weitergehende Hydratation des Hüttensandes des HGZ-Bindemittels stattgefunden (siehe Anlagen 19 a und 19 b). Bei der nur 17 Tage langen Quellphase der HGZ-Faserstopfmörtelprismen ohne MC-Modifizierung wurde eine Reduzierung der austrockenbaren Wassermenge bei der 2. Schwindphase nicht beobachtet (siehe Anlage 14).

Auf jeder geschnittenen Prismenfläche waren nach der 2. Schwindphase etwa 3 bis 6 Haarrisse zu erkennen, deren Rißufer geringfügig aufgewölbt schienen. Die Risse begannen an den Längskanten; es wird vermutet, daß es sich wegen der Verformungsbeträge um Schwindrisse handeln dürfte. Die Mörteloberflächen waren mit einer dünnen Haut bedeckt, die auf den geschnittenen Prismenflächen augenscheinlich weitgehend geschlossen war und vermutlich aus MC bestand. Beginnt die Schwindmessung bei einem größeren Mörtelalter, dann ist die Bindemittelhydratation weiter fortgeschritten, so daß sich wegen der höheren Wasserbindung geringere Schwindwerte ergeben werden (siehe 2. Schwindphase). Die Methylcellulose bindet einen Teil des Anmachwassers, der vermutlich nicht ganz für Hydrationsreaktionen verfügbar ist, trotzdem aber schwindwirksam bleibt. Bei der Druckfestigkeitsprüfung entstanden trotz angenommener höherer Wasserbindung (z. B. 180 d WL) keine größeren Festigkeiten (siehe Anlage 19).

Die bei diesen Labormessungen bis zur Einstellung ungefährrer Gleichgewichte notwendigen Meßzeiten stellen jedoch keine praxisrelevante Wirkungskdauer für konstante Klimate dar, so daß unter praktischen Bedingungen und im Steinkontakt vermutlich nicht so hohe hygrische Verformungswerte eintreten werden.

Wenn sich diese Längenänderungen auch für entsprechenden Mörtel zwischen fixierten Natursteinen bestätigen sollten, dann müßte über eine begrenzte Magerung des MC-modifizierten Mörtels z. B. mit Kalksteinmehl nachgedacht werden (siehe Punkt 8).

3.2.3 Zentrische Zugfestigkeit

Die Untersuchungsergebnisse Prüfdichte, dynamischer E-Modul, zentrische Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Druckfestigkeit sind auf Anlage 20 angegeben. Die Rohdichte MC-modifizierter Prismen entsprach etwa der nichtmodifizierter Fasermörtelprismen (siehe Anlage 10).

Der dynamische E-Modul dieser Probekörper war ähnlich wie der der Festigkeits-Prüfkörper: zeitabhängig erhöhte er sich vom 34. bis 218. Tag besonders bei hoher Lagerungsfeuchtigkeit um etwa 4000 N/mm² auf etwa 19500 N/mm², bei herstellungsfeuchter Lagerung um 2000 N/mm² auf 16600 N/mm² und im Klima 20/65 blieb er mit fast 14000 N/mm² unverändert. Die zentrische Zugfestigkeit betrug unabhängig vom Lagerungsklima bei einem Probenalter von 34 Tagen 1,8 bis 2,2 N/mm². Außer bei wassergelagerten Prüfkörpern erhöhte sie sich bis zum Prüfalter von 218 Tagen auf 2,0 bis 2,5 N/mm². Größere Unterschiede zu dem nicht modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel bestanden nicht; im Klima 20/65 unterblieb eine zeitabhängige Reduzierung, die bei unmodifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel festgestellt worden war.

Die Bruchdehnung reduzierte sich bei Lagerung im Wasser bzw. im Klima 20/99 zeitabhängig gering. Die Druckfestigkeit, die nach der Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit an den Prismen bestimmt wurde, war etwas niedriger als die im Rahmen der Festigkeitsuntersuchung ermittelte.

3.2.4 Wärmedehnkoeffizient

An 4 aus MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtel hergestellten Prismen wurde im Alter von 197 Tagen (173 Tage im Klima 20/65) ein mittlerer Wärmedehnkoeffizient von $12,0 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} \cdot \text{K}^{-1}$ (Variationskoeffizient $V = 3,4 \%$) bestimmt. Im Vergleich mit dem Wärmedehnkoeffizient gemagerter bzw. ungemagerter, nicht modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel von etwa $9,5 \cdot 10^{-6} \text{ m/m} \cdot \text{K}^{-1}$ ist dieser um 25 % größer.

3.2.5 Frostwiderstandsfähigkeit

Je 4 bis zum 7. Tag nachbehandelte MC-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtelprismen, die danach entweder 93 Tage im Wasser lagerten oder sich 88 Tage im Klima 20/65 und 5 Tage im Wasser befanden, wurden dicht in Folie eingepackt und 50 Frost-Tau-Wechseln (FTW) zwischen - 20°C und + 20°C ausgesetzt. Vor der FTW-Behandlung wurden die dynamischen E-Moduli und Massen sowie nach dem 50. FTW die dynamischen E-Moduli, die Massen, die Biegezug- und Druckfestigkeiten sowie die Trockenmassen der Prismen bestimmt. Die Ergebnisse sind auf Anlage 21 angegeben:

Der dynamische E-Modul hat sich durch die 50 FTW nicht bzw. nur gering reduziert; er blieb noch etwa so groß wie der wassergelagerter Prüfkörper (siehe Anlage 19). Die Biegezug- und Druckfestigkeit 93 Tage wassergelagerter Prismen glichen nach den 50 FTW den entsprechenden Werten wassergelagerter Prismen, d.h. bei ihnen wirkten die 50 FTW nicht festigkeitsmindernd. Aus dem Festigkeitsvergleich zwischen den FTW-belasteten, vorher 88 Tage in 20/65 gelagerten Proben und den 83 Tage in 20/65 gelagerten Proben ohne FTW-Belastung ergab sich, daß offenbar die Festigkeiten dieser Proben durch die 50 FTW etwas reduziert wurden. Die Feuchtigkeiten aller Proben blieben durch die 50 FTW fast unverändert (siehe Anlagen 19 und 21). Risse oder Abplatzungen waren an den Prismen nach den 50 FTW augenscheinlich nicht zu erkennen. Die an diesen Prismen durch die FTW festgestellte gemittelte Massendifferenz von 0,8 g beruht auf Feuchtigkeitsaustritt aus den Prismen innerhalb der Folien.

3.3 Zentrival FM 20-Mörtel

Dieser kunststoffmodifizierte Restauriermörtel mit Zement als Bindemittel wurde als Variante für prüftechnische und stoffliche Probleme sowie zur Klärung der Frage verwendet, welche Haftzugfestigkeit mit Sander Schilfsandstein im Gegensatz zu HGZ-Faserstopfmörtel erzielt werden kann. Dabei wurden auch mörteltechnische Untersuchungen an 4 x 4 x 16 cm³ großen Zentrival FM 20-Prismen, die aus gespritzten 4 x 17 x 17 cm³ großen Mörtelplatten ausgeschnitten wurden, durchgeführt.

3.3.1 Mechanische Eigenschaften

Die Ergebnisse sind in Anlage 22 dargestellt. Für gespritzten Zentral FM 20-Mörtel ergab sich ab einem Alter von 7 Tagen bei Lagerung in Feuchtklimaten ein dynamischer E-Modul von etwa 35000 N/mm² bis 38000 N/mm²; bei Lagerung im Klima 20/65 lag er nur bei etwa 30000 N/mm² bis 32000 N/mm². Die Biegezugfestigkeit verschieden gelagerter Prismen schwankte zwischen 5 N/mm² und 9 N/mm², wobei die Werte herstellungsfeucht gelagerter und anschließend bei 60°C getrockneter Prismen am höchsten waren. Herstellungsfeucht gelagerte Prismen besaßen für jeden Prüftermin die niedrigsten mittleren Biegezugfestigkeiten. Wassergelagerte und im Klima 20/99 gelagerte Prismen unterschieden sich unabhängig vom Prüfalter festigkeitsmäßig nicht. Die mittlere Druckfestigkeit herstellungsfeucht gelagerter Prismen war an allen 3 Prüfterminen mit ≥ 48 N/mm² etwas größer als die im Klima 20/65, im Klima 20/99 bzw. im Wasser gelagerter Prismen.

Die Rohdichten in 20/65 gelagerter Prismen waren mit etwa 2080 kg/m³ nur wenig kleiner als die herstellungsfeucht gelagerter; die Rohdichten im Feuchtklima 20/99 bzw. in Wasser gelagerter Prismen waren mit etwa 2140 kg/m³ etwas höher und untereinander fast gleich. Die Druckfestigkeiten wassergelagerter Prismen wurden durch höhere Prüffeuchtigkeiten und offenbar infolge Kunststoffquellung reduziert, wie es wegen der höheren Druckfestigkeiten getrockneter Prismen angenommen werden kann.

3.3.2 Zentrische Zugfestigkeit

Wegen der nach der Prüfung an den Prismenstirnflächen festgestellten Mörtelinhomogenitäten betrug die zentrische Zugfestigkeit nach einem Prüfalter von etwa 70 Tagen höchstens 2,0 N/mm² für die verschiedenen Lagerungsarten (siehe Anlage 23). Deshalb wurden die Proben anschließend beidseitig um je etwa 2 cm gekürzt und nach zwischenzeitlicher Raumlufthaltung erneut geprüft. Die mittleren Zugfestigkeiten dieser Prismen waren nun deutlich höher, sie schwankten für die verschiedenen Lagerungsarten zwischen 2,7 N/mm² und 4,3 N/mm².

Andere Prismen lagerten 188 Tage in den verschiedenen Klimaten, wurden beidseitig ebenfalls um je etwa 2 cm gekürzt und nach 50 Tagen Raumluftlagerung geprüft: Die mittlere Zugfestigkeit schwankte für die verschiedenen Lagerungsbedingungen zwischen 2,9 N/mm² und 3,8 N/mm², die zeitabhängigen Tendenzen waren nicht einheitlich (siehe Anlage 23). Die zentrische Zugfestigkeit dieser Mörtel betrug etwa das 1,5fache der zentrischen Zugfestigkeit der verschiedenen HGZ-Faserstopfmörtel. Die gemittelte Bruchdehnung der Prismen schwankte zwischen 0,10 ‰ und 0,20 ‰.

3.3.3 Wärmedehnkoeffizient

Diese Prüfung erfolgte an je vier 28 Tage bzw. 180 Tage alten Prismen nach Lagerung von 21 Tagen bzw. 173 Tagen im Klima 20/65.

Folgende Ergebnisse wurden erhalten:

Prüfalter	Lagerungsart	Wärmedehnkoeffizient
Tage	-	$10^{-6} \text{ m/m K}^{-1}$
28	21 d in 20/65	16,5
180	173 d in 20/65	14,3

Der Wärmedehnkoeffizient dieses Mörtels war mit etwa $15,0 \cdot 10^{-6} \cdot \text{m/m} \cdot \text{K}^{-1}$ etwa um 50 % bzw. 25 % größer als der des ungemagerten bzw. MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels.

3.3.4 Frostwiderstandsfähigkeit

Vier Prismen, die etwa 100 Tage im Klima 20/65 und 5 Tage in Wasser lagerten sowie vier 106 Tage wassergelagerte Prismen wurden mit 50 Frost-Tau-Wechsel (FTW) nach DIN 52 252 Teil 1 zwischen - 20°C und + 20°C belastet. Jeder Zyklus dauerte 10 Stunden. Während 3 Stunden wurde von etwa + 18°C auf $\leq - 12^\circ\text{C}$ abgekühlt, daran schloß sich 2 Stunden lang eine weitere Abkühlung bis auf - 20°C und eine Erwärmung auf - 12°C an. Dann folgte eine dreistündige Auftauphase bis + 18°C, der eine zweistündige Wasserlagerung bei einer Temperatur von 18°C bis 22°C nachgeschaltet war. Die Temperaturen wurden in einem Prisma von 4 x 4 cm² Querschnitt gemessen /11/. Nach 15, 35 und 50 FTW wurden die Massenverluste der in

Folie eingeschweißten Prismen gemessen. Durch die dichte Einhüllung der Prismen in Folie konnten während der 50 FTW keine unkontrollierten Masseverluste bzw. Auslaugungen stattfinden. Die Ergebnisse der Messungen enthält Anlage 24.

Der dynamische E-Modul war vor Beginn der 50 FTW etwa gleich groß wie nach Ende dieser Belastungen. Die trockenen Absprengungen betrugen insgesamt nur etwa 0,3 M.-% der Trockenmasse der Prismen. Während der ersten 15 Zyklen entstanden etwa 50 % der Absprengungen. Die Biegezug- bzw. die Druckfestigkeit erreichte nach 50 FTW im Mittel $7,5 \text{ N/mm}^2$ oder $9,3 \text{ N/mm}^2$ bzw. $41,0 \text{ N/mm}^2$ oder $44,3 \text{ N/mm}^2$, die etwa den Mittelwerten entsprachen, die verschieden gelagerte 90 Tage alte Prismen besaßen (siehe Anlage 22). Die 50 FTW beeinträchtigten die Eigenschaften dieser Prismen somit kaum.

3.4 Alternative Verfugmörtel

Um die mörteltechnische Qualität des HGZ-Faserstopfmörtels bewerten zu können, wurden Festigkeitseigenschaften folgender alternativer Verfugmörtel von steifer, stopfbarer Konsistenz orientierend untersucht:

- gemagerte HGZ-Mörtel ohne Lignocellulosefasern, teilweise mit LP-Mittel
- Tubag-Traß-Mörtel (Traß-Kalk-Trockenmörtel)
- Tubag-Saniermörtel für gipshaltiges Mauerwerk (Trockenmörtel)
- Colfimit 8434 (modifizierter Kalk-Trockenmörtel)
- schrumpfkompensierter HGZ-Faserstopfmörtel (Versuch Nr. 30)

Mörtelrezepturen und Festmörteleigenschaften sind auf Anlage 25 zusammengestellt, nutzbare Hinweise zur E-Modulreduzierung ergaben sich kaum.

Für unterschiedlich hoch gemagerten faserfreien HGZ-Stopfmörtel ergab sich ein gemittelter dynamischer E-Modul von 31000 N/mm^2 bis 35000 N/mm^2 , der den E_{dyn} -Werten des Zentrival FM 20-Mörtels entsprach. Die Zugabe von 1 M.-% Luftporenbildner (bzg. auf BM) ergab bei gleicher Magerung und etwas reduziertem Wasseranteil eine E-Modulreduzierung von etwa 15 %; trotzdem war dieser E-Modul noch

reichlich doppelt zu hoch wie der von MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel. Bis zum 28. Tag blieb der Unterschied des E_{dyn} für herstellfeuchte bzw. in 20/65 gelagerte Proben unbedeutend. Der E_{dyn} der Tubag-Mörtel und des Colfirmit-Mörtels entsprach im herstellfeuchten Zustand dem der HGZ-Faserstopfmörtel, jedoch waren die Festigkeiten dieser Mörtel äußerst gering. Bei beiden Tubag-Mörteln war E_{dyn} für in 20/65 gelagerter Proben um 50 % größer als der herstellfeuchter, was für HGZ-Mörtel und Zentrivalmörtel nicht zutraf und offenbar durch behinderte Karbonatisierung des Kalks bei herstellfeuchter Lagerung bewirkt wurde. E_{dyn} des mineralisch-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels (Versuch Nr. 30) war im herstellfeuchten Zustand um etwa 60 % größer als MC-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel; bei Lagerung im Klima 20/65 glich E_{dyn} fast dem entsprechenden Wert des MC-modifizierten.

Die Biegezugfestigkeit β_{BZ} herstellfeuchter faserfreier HGZ-Mörtel entsprach etwa der faserhaltiger HGZ-Mörtel; durch LP-Mittelzugabe reduzierte sich β_{BZ} etwas. Die β_{BZ} -Abnahme in 20/65 gelagerter faserfreier HGZ-Prismen um etwa 40 ... 60 % entsprach fast der für HGZ-Faserstopfmörtel festgestellten Tendenz. Die Biegezugfestigkeit der Tubag- bzw. Colfirmit-Mörtel betrug herstellfeucht etwa nur 1/4 der β_{BZ} der HGZ-Mörtel; in 20/65 gelagerte Prismen des Tubag-Traß-Mörtels waren etwa so fest wie faserfreie bzw. faserhaltige HGZ-Stopfmörtel. Der Tubag-Mörtel für gipshaltiges Mauerwerk und Colfirmit-Mörtel erreichten in 20/65 nur geringe β_{BZ} . Die Biegezugfestigkeit des mineralisch modifizierten "schrumpfkompensierten" HGZ-Faserstopfmörtels war im Klima 20/65 mit $> 5 \text{ N/mm}^2$ am höchsten.

Die Druckfestigkeit β_D faserfreier, verschieden gemagerter HGZ-Mörtel betrug im herstellfeuchten Zustand etwa 32 bzw. 37 N/mm^2 und nach Lagerung im Klima 20/65 34 N/mm^2 bzw. bis 43 N/mm^2 . Eine Erhöhung der Magerung ergab eine geringere β_D ; sie erhöhte sich durch einen etwas geringeren Wasser-Bindemittel-Wert bei LP-Mittelzugabe. Die dazu vergleichsweise mit den Tubag-Mörteln bzw. Colfirmit-Mörtel erzielte β_D betrug im herstellfeuchten Zustand höchstens 20 % der entsprechenden β_D -Werte faserfreier HGZ-Mörtel. Entsprechend der β_{BZ} -Tendenz erhöhten sich im Klima 20/65 β_D des Tubag-Traß-Mörtels und weniger umfangreich des Colfirmitmörtels, während der Tubag Saniermörtel für gipshaltiges Mauerwerk hier nur

wenig druckfest war. Die Druckfestigkeit des "schrumpfkompensierten" HGZ-Faserstopfmörtels betrug etwa 30 N/mm^2 und war etwa so groß wie die des MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels.

Messungen zur hydratationsbedingten Längenänderung dieser Mörtel wurden an herstellfeuchten Prismen während der ersten 7 Tage ab dem 2. Tag durchgeführt. Obwohl die Längenänderung bis zum Entschalzeitpunkt unbekannt blieb, die aber wegen der geringen Hydratationsgeschwindigkeit dieser Mörtel nicht zu groß sein dürfte, konnte für die HGZ-Mörtel eine Quellung von $\leq 0,8 \text{ mm/m}$ festgestellt werden. Für Tubag- und Colfirmitmörtel blieb der Quellwert äußerst gering. Für den "schrumpfkompensierten" HGZ-Faserstopfmörtel ergaben diese orientierenden Messungen einen geringen Schwindwert.

Beide Tubag Mörtel und der Colfirmitmörtel entwickelten vergleichsweise zum HGZ-Faserstopfmörtel geringere Festigkeiten; E_{dyn} entsprach etwa dem des HGZ-Faserstopfmörtels. Gemagerte, faserfreie HGZ-Mörtel besaßen höhere Druckfestigkeiten und etwa gleichgroße Biegezugfestigkeiten wie HGZ-Faserstopfmörtel; die E_{dyn} -Werte sind jedoch mindestens doppelt so groß. Der mineralisch modifizierte, "schrumpfkompensierte" HGZ-Faserstopfmörtel entsprach in 20/65 hinsichtlich E_{dyn} , β_{BZ} und β_{D} dem MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtel. Kunststoffmodifizierter Zentrivalmörtel war dem MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtel betreffs E_{dyn} , β_{BZ} und β_{D} überlegen.

3.5 Kapillare Wasseraufnahme

Die orientierende Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme 3 verschiedener HGZ-Faserstopfmörtel und vergleichend von Zentrival FM 20-Mörtel wurde an je vier $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ großen Prismen nach DIN 52 617 bei einer Saugfläche von $4 \times 4 \text{ cm}^2$ durchgeführt. Die berechneten Wasseraufnahmekoeffizienten ω werden nachfolgend angegeben:

Mörtelrezeptur (n = 4)	Herstellung; Lagerklima bis Versuch	Rohdichte getrocknet bei 60°C	Wasseraufnahme- koeffizient Prüfung: 8.1.92	Wasseraufnahme nach 49 Stunden
-	-	kg/dm ³	kg/m ² ·h ^{0,5}	M.-%
HGZ-Faserstopfmörtel; BM: 78/15/7; W = 0,5 x _F = 0,05; ungemagert	7.9.89; 20/65	1,38	4,31	13,1
HGZ-Faserstopfmörtel; BM: 78/15/7; W = 0,5 x _F = 0,05; x _S = 0,5 (0/2a); gemagert	12.10.89: 20/65	1,62	3,53	9,1
Zentrival FM 20-Mörtel, gespritzt	7.6.90; 20/65	1,97	0,97	2,5
HGZ-Faserstopfmörtel; BM: 85/10/5; W = 0,4; x _F = 0,05, ungemagert x _{MC} = 0,0026	13.8.91; in Folie bei 20°C	1,46	0,63	2,0

Die Mantelflächen der Prismen waren mit SIKA ICOSIT 366 beschichtet. Nicht modifizierte, gemagerte bzw. ungemagerte HGZ-Faserstopfmörtel besaßen einen Wasseraufnahmekoeffizienten zwischen 3,5 und 4,3 kg/m²·h^{0,5}, der dem oberen Bereich in /19/ für mineralische Mörtel angegebenen ω -Spanne von 2 bis 4 kg/m²·h^{0,5} entsprach. Dagegen war der ω -Wert des kunststoffhaltigen Zentrival-Mörtels nur etwa 1/3 bis 1/4 und der des MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels nur 1/6 bis 1/7 so groß. Vermutlich quillt vernetzter Kunststoff bzw. MC-Gel während der Meßdauer von 49 Stunden, weshalb die kapillare Wasseraufnahme klein blieb (siehe Anlage 25 a).

3.6 Sorption

Die hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme der Mörtel nach Punkt 3.5 wurde ebenfalls an je vier 4 x 4 x 16 cm³ großen Prismen orientierend bestimmt. Als Meßklimate dienten 20/65 und 20/99. Für die im Klima 20/65 bis Meßbeginn offen gelagerten Mörtelprismen wurde der diesem Klima entsprechende Sorptionswert nach Trocknung bei 60°C berechnet, anschließend lagerten die Prismen im Klima 20/99. Die in Folie eingeschweißten MC-modifizierten Prismen lagerten nach ihrer Trocknung zuerst im Klima 20/65 und später im Klima 20/99, um die entsprechenden Sorptionswerte bestimmen zu können. Nachfolgend werden die erreichten Sorptionsfeuchtigkeiten angegeben, ohne daß bei genannter Meßdauer immer die Gleichgewichtsfeuchtigkeit schon völlig erreicht war:

Mörtelrezeptur (n = 4)	Herstellung; Lagerklima bis Versuch	Rohdichte getrocknet bei 60°C	Sorptionsfeuchtigkeit	
			20/65 (33 d)	20/99 (55 d)
-	-	kg/dm ³	M.-%	M.-%
HGZ-Faserstopfmörtel; BM: 78/15/7; W = 0,5; x _F = 0,05, ungemagert	7.9.89; 20/65	1,40	5,8	30,6
HGZ-Faserstopfmörtel; BM: 78/15/7; W = 0,5; x _F = 0,05, x _S = 0,5 (0/2a); gemagert	12.10.89; 20/65	1,60	3,4	22,2
Zentrival FM 20-Mörtel, gespritzt	7.6.90; 20/65	1,96	2,6	8,4
HGZ-Faserstopfmörtel; BM: 85/10/5; W = 0,4; x _F = 0,05, x _{MC} = 0,0026; ungemagert	13.8.91; in Folie bei 20°C	1,45	3,1	20,2 1)

1) nach 93 Tagen: 22,9 M.-% (V = 2,5 %)

Die im Klima 20/65 aufnehmbare Sorptionsfeuchtigkeit des MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels (W = 0,4) beträgt etwa 3,5 M.-%. Für ungemagerten und nicht modifizierten HGZ-Faserstopfmörtel (W = 0,5) ist die Sorptionsfeuchtigkeit etwa doppelt so groß. Die in diesem Klima für die einzelnen Mörtel festgestellten Unterschiede bleiben in ihrer Tendenz auch im Klima 20/99 erhalten: Im Gegensatz zum Zentrival-Mörtel mit einer Sorptionsfeuchtigkeit von etwa 10 M.-% muß bei HGZ-Faserstopfmörtel bei entsprechender Lagerungsdauer mit einer Sorptionsfeuchtigkeit von ≥ 20 M.-% gerechnet werden.

4. Ergebnisse der Natursteinuntersuchungen

4.1 Verwendete Natursteine und Eigenschaften nach Literaturangaben

Für Verbundstudien mit HGZ-Faserstopfmörtel und alternativen Mörteln wurden vorwiegend Sander Schilfsandstein und begleitend Elmkalkstein, Rühener Grünsandstein, Herdecker Ruhrsandstein und Velpker Sandstein verwendet; ihre Eigenschaften enthalten die Anlagen 26 bis 29. Sie sind erdgeschichtlich verschieden alt. Ergebnisse mikroskopischer Analysen und der Hg-Hochdruck-Porositätsanalysen differieren deutlich (siehe Anlagen 26 und 27). Wegen ihrer unterschiedlichen Entstehungs- und Diagenesebedingungen bestehen innerhalb einer Steinart beträchtliche Schwankungen einzelner Parameter /20, 21/, die gegenüber Kunststein bis zu 100 % betragen

können /14/. Porositätsschwankungen innerhalb einer Sandsteinart können z. B. so groß wie zwischen Sandsteinarten sein /14/. Bei diesen Natursteinen handelt es sich um klastische Sedimente, die durch nachträglich während der Diagenese gebildetes Bindemittel und starke Kompaktion ihre späteren Eigenschaften, wie Kornbindung, Porenradienverteilung, Porosität und Mineralzusammensetzung erhielten (siehe Anlage 26). Nach ihrem Anteil an Komponenten, Bindemittel und sichtbaren Porenraum unterscheiden sich u. a. diese Natursteine, deren thermisch-hygrischen und mechanischen Eigenschaften neben dem Bindemittelanteil und der -art auch vom Grad der mittelbaren oder unmittelbaren Kornbindungen abhängen.

Die Bindung des Sander Schilfsandsteines erfolgt durch kieselige Kornkontakte (Quarz- und Feldspatzement /22/) und tonig-chloritisch (Chlorit: glimmerähnliche Mg-, Fe- und Al-Silikate /23/), die des Rühener Grünsandsteines ist barytisch-kieselig-tonig und Ruhrsandstein ist durch kieselig-toniges Bindemittel und Anwachsäume infolge Drucklösung gebunden /20/. Die Poren des Sander Schilfsandsteines sind mit Chlorit kartenhausartig ausgekleidet bzw. vollständig verfüllt und mit SiO_2 -Gel abgedeckt /21, 22/. Seine Tonminerale (Chlorite, Illite) sind stark auf die Gesteinsbruchstücke konzentriert, wegen deren hohen Anteile und des gering bindewirksamen Chloritsaumes besteht eine unvollständige Zementation /22/. Der Velpker Sandstein ist durch verzahnte Kornkontakte, Anwachsäume und tonig-limonitische Überzüge (Eisenhydroxide) gebunden. Elmkalkstein als chemisches Sediment enthält als Bindemittel 35 % sparitischen Zement ($> 0,02 \text{ mm}$); auffallend sind seine Schichtung und enthaltener Fossilschutt /20/. Weitere Eigenschaften dieser Natursteine enthalten die Anlagen 27 und 28.

Die für die Verbundfestigkeit mit Mörteln wichtigen hygrischen Eigenschaften der Natursteine werden von der Größe des Gesamtporenraumes, der Porenradienverteilung und spezifischen Oberfläche bestimmt /14/. Dieses Porensystem ist ein miteinander kommunizierendes Labyrinth von Räumen unterschiedlicher Formen einschließlich Sackporen. Die Feuchtigkeitsbewegung in diesem kompliziert miteinander verbundenen System ist sehr unübersichtlich /20/. Die kapillare Saugspannung als Motor für die Aufnahme von Befeuchtungs- bzw. Mörtelwasser entgegen der Schwerkraft wird durch Porengeometrie und ihre Verteilung bestimmt.

Für die hygrische Längenänderung klastischer Natursteine sind die eine höhere innere Oberfläche ergebenden Tonmineralien mit ihrem hohen Wasseraufnahmebestreben sowie ihre Verteilung wichtig /14/. Durch Wasseraufnahme kann der Abstand einzelner Tonpartikel vergrößert und äußerlich ein Quellen registriert werden. Stark tonhaltige Sandsteine können bis zu 2 ... 3 mm/m quellen; bereits bei einer relativen Luftfeuchtigkeit $\varphi = 50 \%$ ist ein Quellbetrag von $\leq 20 \%$ und bei φ nahe 100 % von 40 ... 60 % des maximalen feststellbar /14/. Sind Tonmineralien parallel feingeschichtet, so kann der Quellwert senkrecht zur Schichtung doppelt so groß werden wie parallel dazu. Feinkörnige tonreichere Sandsteine ergeben mehr quellbare Kornkontaktstellen und einen höheren Quellwert, obwohl die Tonminerale Kaolinit, Illit und Chlorit als nicht bzw. kaum quellbar gelten /14, 24/. Sander Schilfsandstein kann bis 6 M.-% Tonminerale enthalten, Grünsandstein bis 13 M.-%, Glaukonit /14/. Obwohl der tonmineralähnliche Glaukonit bis zu 40 % quellfähige Zwischenschichten besitzen kann, quillt der Grünsandstein sehr gering, weil die relativ großen Glaukonitkörner von der Matrix isoliert werden. Ihre Einzelquellbeträge wirken deshalb auf das Gesamtgefüge kaum quellend /14/.

Neben einer Beziehung zwischen Quellwert und Tonmineralgehalt konnte keine zwischen Quellwert und Porenradienverteilung erkannt werden. Auch zwischen Quarz/Quarz-Kornkontakte tonfreier Natursteine kann Wasser eingelagert werden, trotzdem quellen diese Steine geringer als tonreiche. Neben der Abhängigkeit der Quellung vom Tonmineralgehalt dürfte diese als nahezu reversible Umkehrung der Schwindung wie sie grundsätzlich durch die Porenradienverteilung mitbestimmt werden. Schwinden kapillarporöser Körper erhöht sich mit zunehmender Entwässerung immer kleinerer Poren und ihrem zunehmenden Anteil sowie der Verformbarkeit der Porenwände. Schwindwirksam sind deshalb weniger Kapillarporen mit großem, sondern mit kleinerem Radius /25/, so daß Natursteine mit vielen feinen Kapillaren stärker quellen müßten als solche mit großen Kapillarporen und steiferen Porenwänden. Diese geometrische Betrachtung erklärt sicherlich allein noch nicht die Haftfestigkeitsunterschiede zwischen verschiedenen Natursteinen und HGZ-Faserstopfmörtel.

Abhängig vom Anteil der Kapillarporen am Gesamtporenvolumen und ihrer Durchmesser- und Porenoberflächenverteilung, der Gleichmäßigkeit der Porenbildung, dem Anteil an Sackporen u. a. ergibt sich die kapillare Wasseraufnahme (Sauggeschwindigkeit, -menge und -dauer) und der kapillare Wassertransport in kapillar befeuchteten Natursteinen. Entstehungsbedingt sind größere Schwankungen möglich /14/. Als Grenzen für den kapillaren Wassertransport gelten Porendurchmesser zwischen etwa $1,5 \mu\text{m}$ und 1 mm , wobei die untere Grenze noch etwas unklar ist, weil bei regelmäßigen Porenwandungen bei einem Porenradius von $r_p = 1,5 \mu\text{m}$ ein Porenunterdruck von 1 bar entstehen würde, bei dem der Wasserfaden zerreißt. Da die Porenabmessungen realer Baustoffe erheblichen Schwankungen unterliegen, wird von Klopfer /26/ für Kapillarporen ein Durchmesserbereich von $\geq 0,1 \mu\text{m}$ bis 1 mm vorgeschlagen. Im Durchmesserbereich von $1,5 \mu\text{m}$ bis $0,1 \mu\text{m}$ erfolgt der Wassertransport durch Diffusion und in den Mikroporen $d_p \leq 0,1 \mu\text{m}$ erfolgt bei durchschnittlicher relativer Luftfeuchtigkeit infolge Dampfdruckerniedrigung Kapillarkondensation. Sie spielt bei Sandsteinen keine besondere Rolle /21/. In den Makroporen mit $d_p \geq 1 \text{ mm}$ folgt Wasser kaum noch der Kapillarkraft, sondern zunehmend der Schwerkraft (Sickerströmung).

Kapillarporen feinkörniger tonhaltiger Sandsteine mit kleinem Radius saugen pro Zeiteinheit zwar kleinere Wassermengen, besitzen aber eine höhere Saugkraft, saugen länger und nehmen daher insgesamt eine größere Wassermenge auf als Steine mit größeren Kapillarporen, in die Wasser schneller eindringt, obwohl die Porensättigung geringer bleibt als in dünneren Kapillarporen /9, 14/. Daher können feinporige Sandsteine anliegendem, noch nicht erhärtetem Mörtel länger und mehr Wasser entziehen als grobporige. Durch interkristalline Quellen der Tonmineralien kann der Saugvorgang durch Porenverengung gebremst werden, diese Sandsteine weichen bald vom linearen Verlauf der Wasseraufnahme ab /21/. Denkbar wäre bei bestimmter Porenradienverteilung der Steine durch Porenselbstverengung dann eine Intensivierung kapillarer Saugkraft, wenn sich das Porenradienniveau zu kleineren Abmessungen mit höheren Saugkräften von $\leq 1 \text{ bar}$ /21, 26/ verschieben würde, wodurch abhängig vom zeitlichen und geometrischen Quellungsfortgang eine Zunahme des Wasserabsaugens aus dem Mörtel einsetzen könnte. Der Kapillarzug ist anfänglich am größten und fällt mit zunehmender

Wassersättigung der Poren. Bei gleicher wasserzugänglicher Porosität der Steine besitzen grobporigere einen höheren Wasseraufnahmekoeffizienten als feinporige. Trotz gleichgroßer Porosität kann die kapillare Saugwirkung dann größer sein, wenn eine Veränderung im Porenradienspektrum auftritt /14/.

Eingespannte quellfähige Natursteine erzeugen bei behinderter Dehnung einen Quelldruck /14/. Sander Schilfsandstein kann bereits nach 3 Stunden 90 % seines Quellmaximums erreicht haben. Bei weniger dichten Steinen wird anfänglicher Quelldruck nach innen kompensiert, jedes weitere Quellen führt dann zu starker Druckerhöhung. Dichte Steine sind nicht komprimierbar, daher äußert sich anfängliches Quellen bereits im Quelldruckanstieg. Die Erhöhung der Haftzugfestigkeit eingespannter Doppelsteinprüfkörper aus kaum quellendem Rüthener Grünsandstein mit abnehmender Vorbefeuchtung dürfte nicht durch Quelldruckwirkung, sondern durch begrenzte Mörtelentwässerung auf eine optimale Größe verursacht worden sein (siehe Punkt 6.1.3).

Die Porendurchmesserverteilung dieser Natursteine zeigt größere Unterschiede (siehe Anlage 27): Der Rüthener Grünsandstein hat etwa bei einem Porendurchmesser $d_p = 10 \mu\text{m}$ ein Porenvolumenmaximum; besitzt aber unterhalb $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ noch einen Porenvolumenanteil von etwa 25 %. Ein solcher Anteil fehlt beim Elmkalkstein, sein Porenvolumenmaximum liegt etwa bei $d_p = 7 \mu\text{m}$. Der Velpker Sandstein hat nur einen geringen Anteil Mikroporen $< 0,1 \mu\text{m}$; seine 2 Porenvolumenmaximas befinden sich etwa bei $d_p = 2 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$. Eine andere Porendurchmesserverteilung haben Sander Schilfsandstein und Herdecker Ruhrsandstein, die 60 % bzw. 45 % ihres Porenvolumens im Mikroporenbereich $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ besitzen. Zum tatsächlichen Porenvolumen in cm^3/g fehlen wegen der prozentualen Berechnung Angaben. Nach /14/ liegt das Porenradienmaximum des Sander Schilfsandsteines bei etwa $50 \mu\text{m}$. Rüthener Grünsand- und Elmkalkstein haben eine Porosität von etwa 24 Vol.-% (siehe Anlage 27). Mit nur 6 Vol.-% ist die Porosität des Herdecker Ruhrsandsteines wegen seiner hohen Rohdichte äußerst gering, was zur niedrigsten Wasseraufnahme dieser verwendeten Natursteine mit $< 2,5 \text{ M.-%}$ führt. Die Porosität des Sander Schilfsandsteines bzw. des Velpker Sandsteines wird mit etwa 20 bzw. 14 Vol.-% angegeben. Die Wasseraufnahme unter Vakuum korreliert mit den Porositäten dieser Natursteine,

was für die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck nicht immer gilt (siehe Anlage 27).

Die hygroskopische Wasseraufnahme dieser Natursteine von < 2 M.-% ist abhängig von der Größe der inneren Oberfläche und damit auch vom Tonmineralgehalt /14/. Die anteilige Porenfüllung kann bis zu 15 ... 25 Vol.-% betragen. Da chlorithaltige Sandsteine nicht intrakristallin quellfähig sind bzw. sein dürften, erfolgt ihre hygroskopische Wasseraufnahme nur über die Oberflächen der Minerale, wobei schon eine geringe Zunahme an Tonmineralien zu deutlichen Erhöhungen der inneren Oberfläche führen kann /14/, was besonders für Sander Schilfsandstein zutrifft. Sandsteine sind dann frostunempfindlich, wenn sie weniger als 90 % Wasser aufnehmen /14/.

Der Wärmedehnkoeffizient der Natursteine schwankt allgemein zwischen $7 \cdot 10^{-6} \text{ m/m K}^{-1}$ für Dolomit bzw. Calcit und $\leq 14 \cdot 10^{-6} \text{ m/m K}^{-1}$ für Quarz; er resultiert aus den Wärmedehnkoeffizienten der einzelnen Komponenten /14/. Karbonathaltiger Grünsandstein hat den niedrigsten Wert; quarzreiche Natursteine besitzen höhere Werte (siehe Anlage 28). Wichtig ist bei thermischer Dehnung auch der Feuchtigkeitsgehalt der Natursteine, denn mit steigender Feuchtigkeit erhöht sich auch ihr Wärmedehnkoeffizient deutlich (z. B. bei Zementmörtel bis zur Verdoppelung) /14/.

4.2 Kapillare Wasseraufnahme

Die Ergebnisse mehrerer Messungen der kapillaren Wasseraufnahme verwendeter Natursteine sind auf den Anlagen 30 bis 33 dargestellt. Der Rütthener Grünsandstein besaß eine 7- bis 9-fach höhere kapillare Wasseraufnahmegeschwindigkeit als der Elmkalkstein bzw. der Sander-Schilfsandstein; die des Elmkalksteins war nur etwa 20 % größer als die des Sander Schilfsandsteins. Die kleinste kapillare Wasseraufnahme besaß der Herdecker Ruhrsandstein; sie betrug nur etwa 1/5 der Wasseraufnahme des Elmkalksteins (siehe Anlage 30, Tabelle A).

Trotz hoher Wasseraufnahme quoll der Rütthener Grünsandstein kaum; dagegen waren die Quellwerte des Ruhr- und besonders des Sander Schilfsandsteins bedeutend größer (siehe Punkt 4.5). Um Hinweise dafür zu erhalten, ob infolge Quellung eine Intensivierung der Kapillarkräfte eintreten könnte, wurden außerdem an je 3 Sander

Schilfsandsteinproben mit unbeschichteten bzw. beschichteten Mantelflächen die kapillare Wasseraufnahme möglichst bis zur Durchfeuchtung der Proben fast 20 Tage lang gemessen (siehe Anlage 30, Tabelle B sowie Anlagen 32 und 33). Aus den Wasseraufnahme-Kurven der 3 beschichteten Proben (Anlage 33) sind einerseits die Einzelwertschwankungen der Wasseraufnahmen z. B. nach 6,4 Tagen zwischen 21,1 und 27,3 kg/m² zu erkennen, zum anderen zeigte besonders Probe 4 und schwächer Probe 5 zwischen dem 1. und 7. Tag einen um 12 % größeren Anstieg als zwischen 1 Stunde und einem Tag. Ähnlich war die Tendenz der Wasseraufnahme unbeschichteter Proben des Schilfsandsteins und Ruhrsandsteins in Anlage 31. Dieses Verhalten könnte als erstes Indiz für eine veränderte Wasseraufnahme infolge "selbstverengter" Poren gelten. Grundsätzlich zeigten die beschichteten Schilfsandsteinproben (siehe Anlage 33) eine gleichmäßigere, vom Klimaschwankungen weniger beeinflusste Wasseraufnahme als die unbeschichteten Proben (siehe Anlage 32). In Anlage 33 wurde auch die an 10 beschichteten Schilfsandsteinproben bestimmte und gemittelte Wasseraufnahme eingetragen (Saugfläche 10 x 20 cm²).

Natursteine mit höherer kapillarer Saugkraft können länger und intensiver gegen den "Entwässerungswiderstand" bzw. das "Wasser-rückhaltevermögen" des mit ihnen im Kontakt stehenden HGZ-Faserstopfmörtels Wasser aus ihm absaugen als grobporigere Natursteine mit geringerem Porenunterdruck. Wird wegen langsamer oder verzögerter Bindemittelhydratation über einen längeren Zeitraum und hoher Saugkapazität der Steine Wasser dem Mörtel entzogen, so können im Mörtel wegen Wasserdefizits Störungen der Hydratation und Festigkeitsentwicklung entstehen; das Mörtelvolumen bzw. die -dicke werden entsprechend reduziert. Obwohl Elmkalkstein und Sander Schilfsandstein eine ähnliche kapillare Wasseraufnahme besaßen, wird die Verbundfestigkeit mit HGZ-Faserstopfmörtel durch den Schilfsandstein stark beeinträchtigt (siehe Punkt 6). Trotz der mehrfach höheren kapillaren Wasseraufnahme des Rühthener Grünsandsteins - bei konstanter Befeuchtungsdauer war er bereits höher wassergesättigt - ist seine Verbundfestigkeit mit HGZ-Faserstopfmörtel ähnlich gut wie zwischen diesem und Elmkalkstein. Die kapillare Aufnahme von Leitungswasser scheint den vom Naturstein auf den Frischmörtel ausgeübten Saugeffekt nur unzureichend zu beschreiben (siehe Punkt 7).

Mit Imprägniermitteln kann die kapillare Wasseraufnahme von Naturstein begrenzt werden, ohne daß dadurch sein Porenvolumen nennenswert verkleinert wird; eine zu überprüfende Maßnahme zur Verbundverbesserung zwischen Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel.

4.3 Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient kennzeichnet als Materialkennwert den zeitlichen Verlauf flächenbezogener kapillarer Wasseraufnahme vom trockenen Zustand bis zur Durchfeuchtung entgegen der Schwerkraft und ohne nennenswerten Überdruck, wobei die Saugfläche ständig nur wenige Millimeter in Wasser eintaucht /27, 28/. Die aus den Wasseraufnahmemessungen (siehe Punkt 4.2) an Natursteinen nach DIN 52 617 berechneten Wasseraufnahmekoeffizienten sind auf Anlage 34 dargestellt. Für Sander Schilfsandstein ergab sich aus mehreren Messungen ein Wasseraufnahmekoeffizient von 1,3 bis 1,5 kg/m²h^{0,5}; er betrug für Elmkalkstein 1,4 kg/m²h^{0,5}, für Herdecker Ruhrsandstein 0,3 kg/m²h^{0,5} und für den Rüthener Grünsandstein 10,3 kg/m²h^{0,5}. Die Zunahme der mittleren Steigung der Wasseraufnahmekurven beschichteter Sander Schilfsandstein-Proben könnte die Annahme bestätigen, daß durch Porenverengung infolge Quellung die Wasseraufnahme intensiviert werden kann (siehe Punkt 4.1).

Ist das Wasserangebot an der Naturstein-Saugfläche geringer, wie etwa bei anliegendem Frischmörtel, so wird die kapillare Wasseraufnahme nur von der verfügbaren Wassermenge und nicht mehr von der Größe des Wasseraufnahmekoeffizienten bestimmt /28/. Beim Kontakt der verwendeten Natursteine mit HGZ-Faserstopf-Frischmörtel ist neben seinem "Entwässerungswiderstand" die bei der Steinvorbefeuchtung bereits aufgenommene Wassermenge für die folgende "Mörtelentwässerung" wichtig. Da die verschiedenen Natursteine gleich lang kapillar befeuchtet wurden, waren sie bei ihrer Verarbeitung zu 2-Stein-Prüfkörpern unterschiedlich hoch mit Wasser gesättigt. Die Sander-Schilfsandsteine saugten aus dem HGZ-Faserstopfmörtel mehr Wasser als Elmkalk- bzw. Rüthener Grünsandsteine (siehe Punkt 6 und 7).

Die Wasseraufnahmekoeffizienten z. B. für Kalkzementputz und Zementputz betragen $2 \dots 4 \text{ kg/m}^2 \text{ h}^{0,5}$ /19/, für den HGZ-Faserstopfmörtel ergaben sich Werte zwischen $0,6$ und $4,3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$ (siehe Punkt 3.5).

Nach den bisherigen Ergebnissen liefert die Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten keine voraussklärende Abschätzung möglicher Verbundfestigkeiten zwischen Natursteinen und HGZ-Faserstopfmörtel.

4.4 Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und 150 bar

An je fünf etwa $5 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ großen Proben von Sander Schilfsandstein (zementgraue und olivgraue Varietät), Rüthener Grünsandstein, Elmkalkstein und Herdecker Ruhrsandstein wurde nach DIN 52 103 die Wasseraufnahme (Unterwasserlagerung) unter Atmosphärendruck bzw. unter 150 bar bestimmt. Die Ergebnisse sind auf Anlage 35 angegeben.

Nach einer Versuchsdauer von 114 Stunden unter Atmosphärendruck bei etwa 20°C betrug die Wasseraufnahme der zementgrauen (höhere Dichte) bzw. olivgrauen Schilfsandsteinproben $6,0 \text{ M.-%}$ bzw. $6,5 \text{ M.-%}$ und die des Rüthener Grünsandsteins $7,5 \text{ M.-%}$. Die Wasseraufnahme der Elmkalksteinproben blieb mit $5,3 \text{ M.-%}$ nur wenig niedriger. Die geringste Wasseraufnahme wurde mit $1,5 \text{ M.-%}$ für Proben des Ruhrsandsteins festgestellt. Bis auf die Proben des Grünsandsteins hatten die Proben der übrigen Steinarten diese Wasseraufnahmewerte bereits nach 40 Stunden fast erreicht. Mit $5,8 \text{ M.-%}$ für Elmkalkstein, $6,5 \text{ M.-%}$ für Rüthener Grünsandstein, $1,8 \text{ M.-%}$ für Ruhrsandstein und $6,5 \text{ M.-%}$ für Sander Schilfsandstein wurden ähnliche Wasseraufnahmen bei einem Partner ermittelt /29/.

Die Wasseraufnahme nach 24 Stunden unter 150 bar war durchschnittlich um etwa 30 bis 50 % höher; bei Elmkalkstein jedoch um 200 % (siehe Anlage 35). Die Größenordnung dieser Wasseraufnahmen unter Atmosphärendruck sowie ihre Tendenz bei höherem Druck entsprach etwa den Angaben auf Anlage 27. Für den unterschiedlichen Einfluß dieser Steinarten auf die Verbundqualität mit HGZ-Faserstopfmörtel (siehe Punkte 6) ergaben diese Messungen keine Erklärung. Die höhere Wasseraufnahme besonders des Elmkalksteins bei Druckerhöhung wirkt auf die Verbundqualität nicht negativ.

Bei früheren Versuchen unter Atmosphärendruck wurden folgende Ergebnisse festgestellt /30/:

Steinart	Wasseraufnahme in M.-% nach		
	12 h	24 h	≥ 140 h
Sander Schilfsandstein	5,6	5,9	-
Elmkalkstein	5,0	5,3	5,6
Kalksandstein	13,5	14,9	15,3

4.5 Hygrische Längenänderung

Je 3 Proben jeder Steinart, an denen unter verschiedenen Drücken die Wasseraufnahme bestimmt wurde (siehe Punkt 4.4), besaßen in jeder räumlichen Richtung 2 Meßstrecken, um mittels Setzdehnmesser (SDM) ihre während der Wasserlagerung eingetretenen Quellungen bestimmen zu können. Die SDM-Messungen der unter Atmosphärendruck wassergelagerten Proben erfolgten nach 40 bzw. 114 Stunden, während diese Messungen an bei 150 bar wassergelagerten Proben (Messung bei Dritten) erst etwa 28 Tage später erfolgen konnten. Wegen offenbar eingetretener Strukturentspannung ergaben die an diesen Proben ermittelten SDM-Werte nicht die Quellung im Druckzustand, sondern sie ergänzten lediglich die unter Atmosphärendruck bestimmten Quellwerte (siehe Anlage 35).

Die Proben des zementgrauen Sander Schilfsandsteines, des Ruhr- und des Grünsandsteines, deren Schichtungslage naß noch sicher erkennbar war, wurden aus neuen Steinen entnommen; die des olivgrauen Sander Schilfsandsteins, der für erste Doppelstein-Prüfkörper verwendet wurde, sind wie die Elmkalksteinproben (gut sichtbare Schichtung) aus Reststücken ausgeschnitten worden. Für die Meßrichtung "senkrecht zur Schichtung" ergaben sich bei 2 Meßstrecken pro Probe insgesamt 6 Einzelwerte je Natursteinart, für die Meßrichtung "parallel zur Schichtung" (quer und längs zur Schichtung) insgesamt 12 Einzelwerte.

Die gemittelten Quellwerte des Elmkalksteins und des Rühener Grünsandsteins waren für beide Druckhöhen auch nach langer Wasserlagerungsdauer mit $\leq 0,1$ mm/m äußerst niedrig. Die Unterschiede

zwischen beiden Meßrichtungen waren bei hoher Streuung gering. Bei Atmosphärendruck nahm die Quellung des Grünsandsteins von der 40. bis zur 114. Stunde noch deutlich zu; diese Endwerte konnten an den bei 150 bar gelagerten Proben offenbar wegen eingetretener Strukturentspannung nicht bestätigt werden (siehe Anlage 35). Die Quellwerte der Ruhrsandsteinproben waren im Vergleich mit den Quellwerten jener Steinarten mit 0,3 bis 0,4 mm/m reichlich dreimal so groß. Die Quellung senkrecht zur Schichtung war um 15 % bis 50 % größer als parallel zur Schichtung. Ab der 40. Stunde erhöhte sich die Quellung nur noch gering. Die Quellwerte nach der Lagerung bei 150 bar waren aus genannten Gründen etwas kleiner bei wiederum gleicher Tendenz bezüglich des Schichtungseinflusses. Die Proben des zementgrauen Sander Schilfsandsteins besaßen von allen untersuchten Steinarten bei Atmosphärendruck mit maximal 1,0 mm/m parallel zur Schichtung und rund 1,6 mm/m senkrecht zur Schichtung die größten Quellwerte. Olivgraue, anfänglich verwendete Sander Schilfsandsteine hatten etwas geringere Quellwerte (siehe Anlage 35). Die nach Wasserlagerung bei 150 bar an zementgrauen Proben bestimmten Quellwerte entsprachen denen bei Atmosphärendruck ermittelten. Proben olivgrauer Schilfsandsteine ergaben hier etwas kleinere Quellwerte.

Werden diese Quellergebnisse auf die unterschiedlichen Verbundfestigkeiten einzelner Steinarten mit HGZ-Faserstopfmörtel bezogen, dann zeigt sich, daß Natursteine mit guter Verbundfestigkeit kaum quellen, während die im Verbund mit HGZ-Faserstopfmörtel problematischen Natursteine (Sander Schilfsandstein, Ruhrsandstein) bei Befeuchtung deutlicher quellen. Folgender Zusammenhang scheint daher gegeben: Die z. B. 1 Stunde lang kapillar befeuchteten Schilfsandsteine wurden mit bereits etwas gequollener Befeuchtungszone zu Doppelstein-Prüfkörpern mit HGZ-Mörtel verfugt. Die von den Steinen aufgenommene Feuchtigkeit verteilte sich nachfolgend über das restliche trockene Steinvolumen, wobei im Mörtelkontaktbereich eine Reduzierung der ursprünglichen Steinfeuchtigkeit und damit eine Steinswindung in 2 Richtungen entstand. Die Steinflanken bewegten sich deshalb vom Mörtel weg. Durch aus dem Mörtel vom Stein abgesaugtes Wasser dürfte dieser Vorgang etwas verzögert werden. Obwohl in der Mörtel-Stein-Kontaktzone außerdem noch Schrumpf- und Schwindprozesse des hydratisierenden Mörtels diese Verformungsbeträge verstärken können, dürften unterschiedliches

Quellen und Schwinden der Steine bei gleicher Mörtelart die Verbundqualität entscheidend beeinflussen.

4.6 Porenradienverteilung

Auf den Anlagen 36 bis 40 sind von jeder verwendeten Natursteinart 4 Porenradienverteilungen dargestellt; über 40 Porenradienklassen sind die entsprechenden Porenvolumina einschließlich ihrer Summenkurven angegeben. Diese Messungen wurden mit einem "Quecksilber-Porosimeter 2000" bei getrennter Bestimmung der Mikro- und Makroporen und Drücken von etwa 0,2 bar bis 2000 bar durchgeführt. Diese Methode erfaßt nur Poren > 4 nm; das Porenvolumen entspricht meist nur 90 % des mit Wasser erfaßbaren Porenvolumens, da die Berechnung unter Annahme zylinderförmiger Poren erfolgt /14/. Weitere Ergebnisse enthalten die Anlagen 41 und 42.

Der für Verbunduntersuchungen meist verwendete Sander Schilfsandstein besaß eine zweigipflige Porenradienverteilung mit Maximas bei Porenradien $r_p = 0,03 \mu\text{m}$ und $3,0 \mu\text{m}$. Die Porenvolumensumme betrug $77 \text{ mm}^3/\text{g}$ und die Gesamtporosität P_G etwa 17 Vol.-%. Der Rüthener Grünsandstein war poröser (P_G etwa 23 Vol.-%), seine Porenvolumensumme betrug etwa $110 \text{ mm}^3/\text{g}$ und das Hauptmaximum der Radienverteilung lag bei $r_p = 16,3 \mu\text{m}$. Elmkalkstein besaß mit $120 \text{ mm}^3/\text{g}$ die größte Porenvolumensumme; die Porenradienverteilung war gleichmäßiger und oft zweigipflig. Das Hauptmaximum lag bei $r_p = 1,1 \mu\text{m}$, P_G betrug 24,7 Vol.-%. Herdecker Ruhrsandstein hatte die kleinste Porenvolumensumme von $17,8 \text{ mm}^3/\text{g}$, ein Porenradienmaximum war etwa bei $r_p = 0,18 \mu\text{m}$ erkennbar. Die Porenvolumensumme wurde erst ab $r_p \leq 1 \mu\text{m}$ deutlich größer. Dieser sehr feinporige und geringporöse Sandstein hatte eine Gesamtporosität von etwa 4 Vol.-%. Der kaum verwendete Velpker Sandstein zeigte eine eingipflige Porenradienverteilung mit dem Maximum bei $r_p = 3,4 \mu\text{m}$. Seine Porenvolumensumme betrug nur $57 \text{ mm}^3/\text{g}$ und die Porosität P_G etwa 13 Vol.-% (siehe Anlage 41).

Für die Kapillarporen ($r_p = 1,5 \mu\text{m}$ bis 1 mm) der einzelnen Natursteinarten wurden aus den Porositätsmessungen folgende Porenvolumina bestimmt:

Natursteinart	kapillar wirksames Porenvolumen (Porenradius $r \geq 1,5 \mu\text{m}$ bis 1 mm)		Anteil des kapillar wirksamen Porenvolumens am gesamten Porenvolumen
	Mittelwert \bar{x} (n = 4)	Variationskoeffizient V	
-	mm^3/g	%	%
Sander Schilfsandstein	32,8	4,0	42,4
Elmkalkstein	49,9	21,8	41,6
Rüthener Grünsandstein	84,3	2,3	76,9
Herdecker Ruhrsandstein	2,1	20,4	11,8
Velpker Sandstein	41,3	4,2	72,3

Nach diesen Ergebnissen verfügte der Ruhrsandstein über fast kein kapillar wirksames Porenvolumen, 88 % seines Gesamtporenvolumens entfiel auf Radienklassen $< 1,5 \mu\text{m}$. Der Grünsandstein hatte das größte kapillar wirksame Porenvolumen, das 3/4 seines Gesamtporenvolumens ausmachte. Der Sander Schilfsandstein, der Velpker Sandstein und der Elmkalkstein hatten in dieser Reihung ein etwas zunehmendes kapillar wirksames Porenvolumen von etwa der Hälfte des Grünsandsteinporenvolumens. Es betrug bei Sander Schilfsandstein und Elmkalkstein knapp die Hälfte und beim Velpker Sandstein knapp 3/4 des jeweiligen Gesamtporenvolumens. Betrachtet man das kapillar wirksame Porenvolumen wegen einer mechanischen Verankerungsmöglichkeit als besonders verbundeffektiv, dann dürfte zwischen Mörtel und Grünsandstein leichter ein guter Verbund entstehen als mit Ruhrsandstein, - was auch zutraf - mit den anderen Natursteinen könnten sich dazwischen liegende Verbundeigenschaften entwickeln.

Aus der Porositätsanalyse ergaben sich für Strukturunterschiede der 5 Natursteinarten noch folgende charakteristischen Porenvolumenanteile:

Natursteinart	Porenradienklasse 1 μm		Porenradienklasse 0,1 μm	
	Porenvolumenanteil, der auf Porenradien $\geq 1 \mu\text{m}$ $\leq 1 \mu\text{m}$ entfällt		Porenvolumenanteil, der auf Porenradien $\geq 0,1 \mu\text{m}$ $\leq 0,1 \mu\text{m}$ entfällt	
-	mm^3/g		mm^3/g	
Sander Schilfsandstein	34,9	42,4	51,2	26,1
Elmkalkstein	62,2	57,8	102,6	17,4
Rüthener Grünsandstein	87,5	23,5	93,4	17,6
Herdecker Ruhrsandstein	2,4	13,6	9,1	6,9
Velpker Sandstein	43,8	14,0	54,4	3,4

Rüthener Grünsandstein und auch Elmkalkstein besaßen für $r_p > 1 \mu\text{m}$ die größten Volumenanteile, während Velpker Sandstein und Sander Schilfsandstein sowie besonders Herdecker Ruhrsandstein für diesen Radienbereich nur kleinere Volumenanteile aufwiesen. Noch deutlicher wurden die Volumendifferenzen zwischen den letzteren Natursteinarten und Elmkalkstein für den Radienbereich $r_p > 0,1 \mu\text{m}$.

Die hohe Gesamtporosität des Elmkalksteins und des Rüthener Grünsandsteins (etwa ≥ 24 Vol.-%) werden durch größte Porenvolumen bestätigt, obwohl sich beide Oberflächensummen deutlich unterscheiden (siehe Anlagen 42 und 43). Offenbar sind die Poren des Elmkalksteins regelmäßiger. Trotz kleinerer Porenvolumensumme und Gesamtporosität als vorgenannte Steinarten ist die Porenoberflächensumme des Sander Schilfsandsteins etwa so groß wie die des Rüthener Grünsandsteins; wegen des kleineren mittleren Porenradius weist das auf eine größere Porenanzahl des Schilfsandsteins hin sowie auf einen eventuell höheren Anteil sorptionsbedingter Feuchtigkeitstransporte. Herdecker Ruhrsandstein mit der geringsten Porosität und dem kleinsten Porenvolumen besitzt den niedrigsten mittleren Porenradius, aber die größte Oberfläche des Porenvolumens, eine Bestätigung seiner Feinporigkeit (siehe Anlage 42).

Hinsichtlich des Verbundes mit HGZ-Faserstopfmörtel ergaben die

Natursteine mit dem größten Porenvolumen für $r_p > 1 \mu\text{m}$ die höchsten Haftzugfestigkeiten. Diese Natursteine haben wegen des höheren Makroporenanteils bessere Voraussetzungen für einen tragfähigen mechanischen Verbund und entwässern durch eine "schwächere" Kapillarität den Mörtel weniger extrem als Schilfsandstein, so daß günstigere verbundtechnische Mörtелеigenschaften entstehen können. Das problematische Verbundverhalten des Sander Schilfsandsteins mit HGZ-Faserstopfmörtel, das durch geringe Haftzugwerte, wegen oft größerer konkaver Einbrüche in einer Mörteloberfläche und Ablösungen vom Stein infolge eines vermuteten erheblichen Entzugs von Mörtelanmachwasser charakterisiert wird, erklärt sich aus diesen Untersuchungen besonders durch seine Feinporigkeit und Quellneigung. Da aber mit Zentrival FM 10-Mörtel und Sander Schilfsandstein sehr gute Haftzugwerte entstanden (siehe Punkt 6.2.2), könnten neben dem Polyvinylacetatanteil dieses Mörtels auch Unterschiede zwischen dem HGZ-Bindemittelleim und dem Portlandzementleim in bezug auf die Porositätseigenschaften des Sander Schilfsandsteins für diese Verbundqualität wichtig sein.

4.7 Spezifische Porenoberfläche

Die innere spezifische Oberfläche der Natursteinporen ist abhängig von ihrer Form und Größe; sie wirkt als Reaktionsfläche für chemische Umsetzungen, Lösungs- sowie Ausfällungsmechanismen und ist für Sorptionsvorgänge entscheidend /20/. Wird sie aus der Porenvolumenverteilung bestimmt, so wird jede Pore als Hohlzylinder betrachtet. Mit der Hg-Hochdruck-Porosimetrie wird der Anteil sehr feiner, an der Sorption beteiligter Poren ungenau erfaßt, so daß sich ihre Ergebnisse von denen mit dem als verlässlicher geltenden BET-Verfahren bestimmten unterscheiden /18/.

Nach eigenen Messungen von je 4 Proben (siehe Anlagen 41 bis 43) schwankte die gemittelte spezifische Porenoberfläche der verwendeten Natursteine zwischen $0,5 \text{ m}^2/\text{g}$ (Velpker Sandstein) und $2,9 \text{ m}^2/\text{g}$ (Rüthener Grünsandstein und Sander Schilfsandstein). Elmkalkstein hatte eine spezifische Porenoberfläche von $1,6 \text{ m}^2/\text{g}$ und Herdecker Ruhrsandstein eine von $1,0 \text{ m}^2/\text{g}$. Die Porenoberflächensummenkurve und auch die -verteilung über den Radienklassen stieg für diese Steinarten erst ab $r_p \leq 1 \mu\text{m}$ bzw. $\leq 0,1 \mu\text{m}$ deutlich an (siehe Anlage 43). Der Anteil der Oberfläche kapillar wirksamer Poren an der Porengesamtoberfläche ist verhältnismäßig klein. Ähnliche

spezifische Porenoberflächen können sich bei geringerer Gesamtporosität und höherem Anteil Mikroporen oder bei größerer Gesamtporosität und geringerem Anteil Mikroporen ergeben /20/. Aus den Unterschieden der spezifischen Oberflächen dieser Natursteine kann keine sichere Begründung für die Unterschiede der mit ihnen und HGZ-Faserstopfmörtel erzielten Haftzugfestigkeiten abgeleitet werden.

4.8 Wärmedehnkoeffizient

Nach Literaturangaben schwankt der Wärmedehnkoeffizient von Natursteinen zwischen $7 \cdot 10^{-6} \text{ m/m K}^{-1}$ und $14 \cdot 10^{-6} \text{ m/m K}^{-1}$. Karbonathaltige Natursteine liegen an der unteren Grenze und quarzreiche Natursteine an der oberen Grenze dieses Bereiches. Eigene Messungen wurden nicht durchgeführt.

4.9 Frostwiderstandsfähigkeit

Die verwendeten Natursteine können als frostbeständig eingestuft werden, da die Wasseraufnahme bei Atmosphärendruck für Ruhrsandstein, Schilfsandstein, Grünsandstein und Elmkalkstein 79 %, 74 %, 66 % und 33 % der maximalen Wasseraufnahme bei 150 bar betrugen. Nach /14/ sind Natursteine dann frostunempfindlich, wenn höchstens 90 % des Porenraums mit Wasser gefüllt werden können. Die für die Steinarten in vorstehender Reihenfolge nach DIN 52 103 berechneten Sättigungswerte betrugen 0,79; 0,74; 0,66 und 0,33.

4.10 Sorption

An Proben verwendeter Natursteinarten, die lange im Klima von etwa 20/65 lagerten, wurden nach Trocknung folgende Sorptionsfeuchtigkeiten bestimmt:

Natursteinart	Sorptionsfeuchtigkeit
-	M.-%
Sander Schilfsandstein	0,34
Elmkalkstein	0,10
Rüthener Grünsandstein	0,20
Herdecker Ruhrsandstein	0,10

Messungen in anderen Klimaten wurden nicht durchgeführt.

4.11 Vorbefeuchtungsart und Feuchtigkeitsverteilung

Um durch stark saugfähige Steine einen vorzeitigen und zu hohen Wasserentzug aus dem Mörtel zu vermeiden, sind diese vorzunässen oder es ist ein Mörtel mit verbessertem Wasserrückhaltevermögen zu verwenden und das Mauerwerk ist geeignet nachzubehandeln /7/. Das Vornässen der Steine kann im Labor bei der Herstellung von Verbundkörpern durch Unterwasserlagerung (Tauchen) oder durch kapillares Befeuchten ihrer späteren Mörtelkontaktfläche über eine bestimmte Dauer oder mit einer bestimmten Wassermenge durchgeführt werden. Diese Befeuchtungsarten stellen Kompromisse hinsichtlich der später am Objekt möglichen Befeuchtung dar.

Das Tauchen entspricht zwar fast der Befeuchtung der Mauersteine bei Fugenausräumung mit Hochdruckwasser, führt jedoch in den Steinwürfeln der Doppelsteinproben zu einem etwa kugelförmigen trockenen Steinzentrum, wodurch an der Verfugfläche unterschiedlich hohe Sauggeschwindigkeiten für Mörtelwasser und daher sogar Verbundstörungen entstehen könnten. Einseitiges kapillares Befeuchten der Steinwürfel könnte an der Mörtelkontaktfläche zwar bei etwa gleichmäßiger Sauggeschwindigkeit für Befeuchtungs- und Mörtelwasser zu etwa ebenen Feuchtigkeitshorizonten führen, diese Art entspricht jedoch nicht ganz praxisnaher Befeuchtung. Eine konstante kapillare Befeuchtungsdauer, die in Steinen verschiedener Wasseraufnahmekoeffizienten zu unterschiedlichen Feuchtigkeiten bzw. Saughöhen in der Befeuchtungszone führt, ähnelt jedoch eher einer praxisnahen Befeuchtung als die "Anfeuchtung" z. B. auf eine Feuchtigkeit von $4 \pm 1 \text{ M.-%}$ /6/, was bei verschiedenen Steinarten unterschiedlich lange dauert.

Die Befeuchtung der Steinwürfel zur Herstellung der 2-Steinprüfkörper erfolgte zuerst durch Tauchen und später durch kapillares Befeuchten von meist 1 Stunde. Um die Feuchtigkeitsverteilung in nach beiden Methoden je 1 Stunde lang befeuchteten Schilfsandsteinwürfeln von $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ Größe erkennen zu können, wurden ein getauchter und zwei kapillar befeuchtete Würfel schonend durch horizontale und vertikale Trockenschnitte in Würfel von etwa $1,5 \text{ cm}^3$ aufgeteilt und ihre Feuchtigkeit bestimmt. Die Feuchtigkeitsprofile dieser 3 Würfel sind auf den Anlagen 44 bis 49 dargestellt.

Ergebnisse:

1. Im durch Tauchen allseitig befeuchteten Würfel (siehe Anlage 44 und 45) war die Feuchtigkeit der aus den Würfelkanten entnommenen Meßwürfel wegen ihrer größeren Befeuchtungsfläche am größten. Die Feuchtigkeit anderer Meßwürfel, die einer äußeren Ebene mittig entnommen wurden oder die näher zum Würfelzentrum lagen, war entsprechend kleiner. Die Existenz eines trockenen etwa kugelförmigen Würfelkerns wurde bestätigt. Beim Verbund mit HGZ-Faserstopfmörtel könnte im zentralen Bereich der Mörtelkontaktfläche wegen des Feuchtigkeitsgradienten infolge des trockenen Kerns ein größerer Anteil Wasser aus dem Mörtel abgesaugt werden. Dieser Gradient könnte sich bei längerer Lagerung getauchter Steine in Folie bis zu ihrer Verwendung abbauen.
2. Im 1 Stunde lang einseitig kapillar befeuchteten Würfel wurde entgegen der erwarteten ebenen Feuchtigkeitshorizonte im Horizontalschnitt II ein mittiger Bereich geringerer Feuchtigkeit festgestellt (Anlagen 46 und 47). Die Feuchtigkeit war in der Mitte des Horizontalschnitts II besonders im Vertikalschnitt 2 (siehe Anlage 46) bzw. Vertikalschnitt B (siehe Anlage 47) niedriger als die randseitiger Vertikalschnitte.
3. Bei einem anderen 1 Stunde kapillar befeuchteten Schilfsandsteinwürfel ergab sich bei teilweise engerem Schnitttraster wie beim vorherigen Versuch, daß die Feuchtigkeit im Horizontalschnitt II und teilweise im -schnitt I wieder mittig ein deutliches Minimum besaß (für alle Vertikalschnitte 1 bis 6 bzw. senkrecht dazu A bis F, Anlagen 48 und 49). Die Feuchtigkeit in der Mitte des Horizontalschnitts II war besonders in den Vertikalschnitten 2 bis 4 (Anlage 48) bzw. C bis E (Anlage 49) niedriger als an der Würfeloberfläche.

Zusammenfassend verblieb im getauchten Sander Schilfsandsteinwürfel ein trockenes Zentrum, weshalb sogar auf den Außenflächen des Würfels mittig eine geringere Feuchtigkeit gemessen wurde. Wegen dieses Feuchtigkeitsgradienten, der geringeren Sättigung der Kapillarporen und ihrem höheren Unterdruck besteht hier die Gefahr eines stärkeren Wasserentzugs aus dem Mörtel, was zu lokalen Mörtelablösungen vom Stein und örtlichen Störungen der Hydratation führen kann. Auch bei kapillar befeuchteten Schilfsandsteinwürfeln entstanden teilweise in der Befeuchtungsfläche sowie besonders im nächsten Parallelschnitt mittig etwas niedrigere Feuchtigkeiten, die abgeschwächer zu den genannten Verbundstörungen führen können. Ein während des Befeuchtens auf den Außenflächen der Steine schneller als innen aufwärts wandernder Wasserfilm könnte für eine zusätzliche Befeuchtung der äußeren Steinbereiche sorgen.

5. Ergebnisse an Mauerwerks-Versuchswänden

5.1 Herstellung

In 3 etwa 0,9 x 1,2 m² großen Mauerwerks-Versuchswänden aus in einem U-Profilrahmen in Kalkmörtel verlegten Sander Schilfsand-Bruchsteinen wurden die etwa 10 cm tiefen und ≤ 3 cm breiten Fugen (siehe Anlage 50) mit verschiedenen HGZ-Faserstopfmörteln manuell und mit Zentrival FM 20-Mörtel im Spritzverfahren verfugt (siehe Anlage 51). 7 Tage lang wurden die verfugten Wände durch vorgespannte Folien und nasse Tücher nachbehandelt und dann im Freien etwa in S-Richtung aufgestellt. Bei diesen probeweisen Verfugungen wurde die Verarbeitungseignung der Mörtel studiert und der Zustand der Fugenflanken in größeren Zeitabständen ausgewertet. An entnommenen Bohrkernen ist die Haftzugfestigkeit zwischen Naturstein und den Mörteln bestimmt worden; die Entnahmestellen sind auf Anlage 51 angegeben.

5.2 Haftzugfestigkeit

Am 27.07.1990 wurden aus den Versuchswänden 1, 2 und 4 9 Bohrkern von 10 cm Durchmesser und etwa 25 cm Länge entnommen (siehe Anlage 51), in denen folgende Verfugmörtel enthalten waren:

Mauerwerks-Versuchs-wand	Bohrkern Nr.	Alter des Mörtels	Rezeptur der Mörtel			Mischverfahren
			<u>Sand</u> BM	<u>LC-Faser</u> BM	<u>Wasser</u> BM	
-	-	Monate	-	-	-	-
1	1.1, 1.2	9,5	0,5 ¹⁾	0,05	0,5	maschinell
2	2.1	15	0,5 ²⁾	0,05	0,5	manuell
	2.2	15	0,5 ³⁾	0,05	0,5	
	2.3 2.4	17	0	0,05	0,5 ⁴⁾	
4	4.1, 4.2 4.3	1,5	Zentrival FM 20			Trocken-spritzen

- 1) Mörtelsand 0/2a; 2) Normsand 0,5/1 mm; 3) Normsand 1/2 mm
4) Verzögerer-Zugabe Z = 0,0015 (Redardan)

An den Bohrkernen betrug die Verfugmörteltiefe etwa 10 cm, daran schloß sich herstellbedingt Kalkmörtel MG II a als Grundmörtel an. Die restliche Kernhöhe bestand nur aus Kalkmörtel. Die Bohrkern sind auf den Anlagen 52 bis 55 dargestellt. Bei der Bohrkern-entnahme waren alle mit HGZ-Faserstopfmörtel handverstopften Fugen augenscheinlich dicht und ohne sichtbare Flankenabrisse (siehe Anlagen 56 und 57); wie auch die Bohrkernfugen, außer der Fuge am Bohrkern 2.1 mit einer Breite < 10 mm. Eine am 27.04.92 vorgenommene Inspektion dieser Wände bestätigte diesen früheren Befund, es bestanden keine Flankenabrisse und auch in den fast seit 2 Jahren offenen Bohrungen war der angeschnittene Fugenmörtel visuell unverändert.

Bei der Bohrkernentnahme löste sich an den Bohrkernen 1.1 und 1.2 der Naturstein vom Mörtel, obwohl auch diese Fugen dicht gestopft waren. Die übrigen Bohrkern wurden mit Zentrival FM 10-Mörtel in quadratische Prismen mit 12 cm Kantenlänge umgeformt, von denen jeweils 2 Würfel mit etwa 10 cm Höhe als Haftzugproben abgetrennt worden sind. Der erste Würfel enthielt den jeweiligen Fugenmörtel und der zweite zum Vergleich Kalkmörtel. Beim Trennen löste sich am Würfel 2.2.1 und 2.2.2 der Naturstein vom HGZ-Faserstopfmörtel bzw. vom Kalkmörtel. Die an den übrigen Proben estimmte Haftzugfestigkeit enthält folgende Tabelle (siehe Anlage 58):

Prüfkörper Nr.	Haftzugfestigkeit β_{HZ}		
	Zentrival FM 20-Mörtel	HGZ-Faserstopf- mörtel	Kalkmörtel
-	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
2.1.1	-	0,07	-
2.1.2	-	-	0,32
2.3.1	-	0,15	-
2.3.2	-	-	0,27
2.4.1	-	0,38	-
2.4.2	-	-	0,42
4.1.1	0,15	-	-
4.1.2	-	-	0,06
4.2.1	0,29	-	-
4.2.2	-	-	0,03
4.3.1	0,53	-	-
4.3.2	-	-	0,32
Mittelwert	0,32	0,20	0,24

Diese orientierende Prüfung der Haftzugfestigkeit erbrachte für HGZ-Faserstopfmörtel einen ähnlichen Mittelwert wie für Kalkmörtel. Ungemagerter HGZ-Faserstopfmörtel ergab höhere β_{HZ} -Werte als gemagerter. Inzwischen wurde dieser HGZ-Faserstopfmörtel durch Reduzierung des Wasser-Bindemittel-Wertes auf 0,4 und Zugabe von Methylcellulose für den verbundproblematischen Sander Schilfsandstein modifiziert.

6. Ergebnisse der Haftzugfestigkeitsprüfungen

Im Mittelpunkt der Verbundfestigkeitsuntersuchungen zwischen Natursteinen und schwerpunktmäßig HGZ-Faserstopfmörtel stand die Bestimmung der Haftzugfestigkeit an Doppelstein-Prüfkörpern (siehe Anlage 3). Diese Eigenschaft ist im Gegensatz zur Haftscherfestigkeit unabhängig von Oberflächenrauigkeiten der Steine und gibt den entstandenen Verbundeffekt simuliert für die Stoßfuge wieder.

6.1 HGZ-Faserstopfmörtel

Nur anfänglich wurde Mörtel mit dem Bindemittelrezept Hüttensand : Anhydrit : Portlandzement = 78 : 15 : 8 und einem Wasser-Bindemittel-Wert von 0,50 eingesetzt. Wegen nachgewiesener Ausblühungen wurde dann als Bindemittelrezept 85 : 10 : 5 und als Wasser-Binde-

mittel-Wert 0,4 für HGZ-Mörtel verwendet. Das Faser-Bindemittel-verhältnis x_F betrug 0,05.

6.1.1 Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

Variiert wurde das HGZ-Bindemittelrezept, das Lagerungsklima nach siebentägiger Nachbehandlung (20/65 bzw. 20/99), die Befeuchtungsdauer (1 Stunde bzw. 4,5 Stunden) und die Befeuchtungsart (Tauchen bzw. kapillares Befeuchten) der Steinwürfel, die Lagerung der Prüfkörper bis zum Prüftag ohne oder mit Zwang (siehe Punkt 2.2) sowie das Prüfalter. Die Herstellungsbedingungen und die Haftzugfestigkeiten β_{HZ} der Doppelstein-Prüfkörper, die Eigenschaften der nach der β_{HZ} -Prüfung vom Stein abgelösten Mörtelplatten sowie die Ergebnisse einer abschätzenden Feuchtigkeitsbilanz enthalten die Anlagen 59 und 61.

Die Haftzugfestigkeit der Doppelstein-Prüfkörper, deren Steine 1 Stunde bzw. 4,5 Stunden in Wasser zur Vorbefeuchtung getaucht wurden, betrug nach 28 Tagen und Lagerung in 20/65 ab 7. Tag höchstens 0,38 N/mm² und bei Lagerung in 20/99 $\leq 0,42$ N/mm² (siehe Anlage 59). Vom Prüftag nach 7 Tagen bis zum Prüftag nach 28 Tagen erhöhte sich die Haftzugfestigkeit gering. Nach 90 Tagen war β_{HZ} etwa nur noch halb so groß wie am 28. Tag. Wegen der hohen Streuungen (Variationskoeffizient i. d. R. > 40 %) ist eine detaillierte Bewertung nicht möglich.

Alle Mörtelplatten besaßen auf einer der beiden Steinkontaktflächen eine etwa 30 % bis 50 % große Teilfläche, deren Dicke um $\leq 0,5$ mm geringer war als außerhalb, während die andere Mörtelfläche fast immer eben war. Dieser konkave Bereich wurde oft von "Rissen" begrenzt, die der Grenze eingebrachter Mörtel-Portionen folgten; er begann etwa in halber Fugentiefe und endete meist erst am Stopfende der Fuge (siehe Anlage 60). Dieses schwer erklärbare Phänomen entstand infolge vieler Einflüsse, von denen die Kapillarität der Steine sicher entscheidend ist (siehe Punkt 2.5). Es entstanden an beiden Kontaktflächen unterschiedlich große Verbundflächen und Haftfestigkeiten, wobei der Bruch der Doppelstein-Prüfkörper immer an den "schwächeren" Verbundflächen eintrat. Nachdem diese nach der Prüfung in einigen Fällen versuchsweise verklebt worden waren, entstand bei erneuter Belastung der Bruch

an der anderen Haftfläche bei deutlich höherer Haftzugfestigkeit (siehe Anlage 59, "I" und "II").

Wurden die Steine an der späteren Mörtelkontaktfläche kapillar befeuchtet, dann blieb β_{HZ} bei einer Befeuchtungsdauer von 4,5 h mit etwa $\leq 0,4 \text{ N/mm}^2$ etwa gleich (siehe Anlage 61). Bei hoher Durchfeuchtung des gesamten Steinvolumens (Befeuchtungsdauer 27 Stunden) entstand eine höhere Haftzugfestigkeit von $0,52 \text{ N/mm}^2$. Konkave Bereiche in einer der 2 Mörtelflächen waren dabei kaum feststellbar. Gemäß der Feuchtigkeitsbilanz (siehe Anlage 61) gab der Mörtel nun kein Wasser an die Steine ab, womit sich eine der Schadensursachen für oben genannte Verbundstörungen abzeichnete. Sicherlich waren die Steine durch die Vorbefeuchtung gequollen, jedoch trat bei der austrocknungssicheren Lagerung bis zur Prüfung am 7. Tag kaum verbundstörendes Schwinden auf. Da diese lange Befeuchtungsdauer nicht praxisgerecht war, mußten andere Lösungswege für eine akzeptable Verbundfestigkeit gesucht werden.

Wird der Wasser-Bindemittelwert des Mörtels auf 0,4 reduziert, kann dadurch bei gutem WRV des Mörtels weniger Wasser durch die Steine abgesaugt werden, was zu einer geringeren Reduzierung der Mörteldicke (konkave Bereiche), aber andererseits auch zu stärkerer Mörtelschädigung führen könnte. Entsprechende Prüfkörper besaßen jedoch sehr niedrige Haftzugfestigkeiten (siehe Anlage 61), weil die Steine dem Mörtel offenbar zu viel Wasser entzogen haben (Bildung konkaver Bereiche). Eine längere Befeuchtungsdauer (4,5 Stunden) erhöhte β_{HZ} nicht. Es scheint, daß sich das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels nun durch einen schlechteren "Aufschluß" der Ausgangsstoffe beim Mischen verschlechtert haben könnte. Zwischen reinem mineralischen HGZ-Mörtel und Sander Schilfsandstein entstand keine befriedigend hohe Haftzugfestigkeit. Versuche mit modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel mußten daher folgen.

Zu den weiteren Eigenschaften dieser Doppelstein-Prüfkörper ist anzumerken, daß getauchte Schilfsandsteine eine etwas höhere Feuchtigkeit als kapillar befeuchtete besaßen (siehe Anlage 61) und daß diese höhere Steinfeuchtigkeit und der Wasser-Bindemittelwert $W = 0,5$ eine größere Prüffeuchtigkeit des Mörtels von $\geq 14 \text{ M.-%}$ als bei kapillar befeuchteten Steinen und $W = 0,4$ mit

etwa 11 M.-% ergab; die Trockenrohdichte und auch die -druckfestigkeit erhöhten sich mit kleinerem W-Wert. Diese Mörtel Eigenschaften waren jedoch kleiner als die von Doppelstein-Prüfkörpern aus Elmkalk- bzw. Rüthener Grünsandstein (siehe Anlagen 62 und 63). Wurden Prüfkörper bis zur Prüfung mit Folie abgedeckt im Klima 20/65 gelagert, dann nahmen die Schilfsandsteine eine größere Wassermenge aus dem Mörtel auf; außerdem gab dieser noch etwas Feuchtigkeit an die Umgebung ab. Entfiel die Abdeckung im Klima 20/65, dann gaben Steine und Mörtel mit zunehmendem Alter Feuchtigkeit an die Raumluft ab. Sehr hoch befeuchtete Steine nahmen aus dem Mörtel kein Wasser mehr auf, β_{HZ} erreichte einen höheren Wert. Dagegen nahmen die $\leq 4,5$ h kapillar befeuchteten Schilfsandsteine bei $W = 0,4$ etwa durchschnittlich 50 g bis 60 g Wasser aus dem Mörtel auf, wodurch der für die Hydratation verfügbare Wasseranteil klein wurde, Mörtelablösungen durch konkave Bereiche auftraten und der Mörtel keine optimalen Verbundeigenschaften erreichen konnte.

6.1.2 Elmkalkstein-Prüfkörper

Im Gegensatz zur niedrigen Verbundfestigkeit der Schilfsandstein-Prüfkörper ergab sich zwischen Elmkalksteinen und HGZ-Faserstopfmörtel eine gute Haftzugfestigkeit von gemittelt etwa $0,60 \text{ N/mm}^2$, womit gute Haftscherfestigkeiten zwischen diesen Komponenten bestätigt wurden /30/. Blieben die Doppelstein-Prüfkörper bis zum Prüftag fest in der Form eingespannt, dann betrug der β_{HZ} -Mittelwert nur etwa 50 % des für zwangsfrei gelagerte Proben geltenden Mittelwertes (siehe Anlage 62).

Der für händig gestopfte Fugen bestehende subjektive Einfluß auf β_{HZ} sowie jener in 2 verschiedenen Cavitron-Zwangsmischern hergestellte HGZ-Faserstopfmörtel wurde mit Elmkalkstein abgeschätzt (siehe Anlage 62). Zwischen den β_{HZ} -Mittelwerten der von Person S (Nr. 35 und 36) bzw. der von Person P (Nr. 37 und 38) hergestellten Probekörper scheint ein deutlicher Unterschied erkennbar, während die Mischerart ohne Einfluß blieb. Die Mörtelplatten der Prüfkörper Nr. 37 und 38 waren deutlicher blaugrün als die übrigen, offenbar entstanden durch eine intensivere Nachbehandlung (Fremdwasserzufuhr). Diese intensivere Mörtelverfärbung ergab höhere β_{HZ} -Werte, weil wegen des höheren Feuchtigkeitsangebotes über

28 Tage vermutlich wasserreichere und voluminösere Neubildungen als sonst entstehen konnten, wodurch der Schrumpfeinfluß des Mörtels auf β_{HZ} kleiner blieb. Die Prüffeuchten des Mörtels waren jedoch etwa gleich groß. Mörtel aus dem "stationären" Mischer war etwas weniger dicht und druckfest als jener vom "mobilen" Mischer, obwohl sich die je Mischer gemittelten β_{HZ} -Werte kaum unterschieden. Konkave Bereiche traten an den Verbundflächen des Mörtels fast nie auf.

Gemäß Feuchtigkeitsbilanz gaben die Steine bis zum Prüftag gemittelt etwa 18 g Wasser und der Mörtel etwa 3 g Wasser ab. Bei Feuchtigkeitsangebot von außen (Nr. 37 und 38) erhöhten sich die Steinmassen und die Mörtelplatten gaben etwa 13 g Wasser ab. Eine mittlere Festmörtel-Trockenrohdichte von $> 1,60 \text{ kg/dm}^3$ ergab Trocken-Druckfestigkeiten des Mörtels von $> 65 \text{ N/mm}^2$ und damit höhere Werte vergleichsweise zu den Schilfsandstein-Prüfkörpern.

6.1.3 Rüthener Grünsandstein-Prüfkörper

Ähnlich wie β_{HZ} -Prüfkörper aus Elmkalkstein ergaben Doppelstein-Prüfkörper aus Grünsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel (85/10/5; $W = 0,4$; $x_F = 0,05$) im Mittel Haftzugfestigkeiten von etwa $0,58 \text{ N/mm}^2$ (siehe Anlage 63). Bei einer Wiederholungsprüfung wurde dieser β_{HZ} -Mittelwert bestätigt; auch bei einem weiteren Versuch, bei dem die kapillare Befeuchtungsdauer der Steine von bisher 1 Stunde auf 30 min reduziert wurde. Die bisherige mittlere Haftzugfestigkeit halbierte sich, wurde die Befeuchtungsdauer der Steine auf 10 min gekürzt. Diese β_{HZ} -Prüfkörper lagerten bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen austrocknungssicher unter Folie und zwängungsfrei hochkant stehend im Klima 20/65. Überraschend hoch mit $1,15 \text{ N/mm}^2$ war die mittlere β_{HZ} von Prüfkörpern, die bis zum Prüftag nach 28 Tagen in der Stahlform fest eingespannt blieben, deren Steine nur 10 min kapillar befeuchtet wurden und die bei 20/65 austrocknungsgeschützt im Foliensack lagerten. Die Prüffeuchtigkeit des Mörtels war trotz der hohen β_{HZ} niedriger als bei höherer Befeuchtungsdauer.

Alle Grünsandsteine, die bei der Vorbefeuchtung eine verhältnismäßig hohe Feuchtigkeit erreichten, nahmen bis zum Prüftag kaum Wasser aus dem Mörtel auf, in einigen Fällen war sogar eine Massereduzierung der Steine festzustellen, wie bei letzterem Versuch für Steine und Mörtel mit etwa 20 g. Konkave Bereiche waren in den Mörtel-Kontaktflächen nicht festzustellen. Obwohl für die Feuchtigkeitsbilanz eingespannter Prüfkörper eine ihren Herstellungszustand charakterisierende Massenangabe fehlte, galt das nicht für die Steinmassen, die zum Herstellungszeitpunkt bekannt waren und die sich für den Prüfzustand (Steinmasseverlust wegen Abschlagens angeklebter Zugplatten) aus der Differenz (Prüfkörpermasse Prüfung minus Mörtelmasse Prüfung ohne Steinanhang) berechnen ließen. Der "Widerspruch" zwischen der Steinmasseänderung des Versuches Nr. 25 (+ 13 g, zwangsfrei gelagert) und Nr. 22 (- 20 g, eingespannt gelagert) läßt sich bei gleicher Befeuchtungsdauer mit der anderen Lagerungsart nicht erklären; durch die Einspannung entstand eine fast vierfach höhere β_{HZ} .

Eine β_{HZ} -Erhöhung könnte z. B. dann eintreten, wenn in Längsrichtung fixierter Prüfkörper eine Pressung z. B. durch Quellung der Steine oder des Mörtels auftritt. Da Grünsandstein nur wenig quillt, bliebe als weitere Quellursache der Mörtel infolge aus den feuchten Steinen abgesaugten Wassers, wobei im Mörtel bald kapillar aktivere Poren als im Stein entstehen müßten. Dazu gibt die Feuchtigkeitsbilanz keine Hinweise. Da die Steine kaum Feuchtigkeit aus dem Mörtel aufnahmen, blieben die Prüffeuchten des Mörtels höher als bei Schilfsandstein-Prüfkörpern; die Trockenrohdichten betrugen mindestens $1,64 \text{ kg/dm}^3$ und die Trockendruckfestigkeiten des Mörtels erreichten Werte von $\geq 70 \text{ N/mm}^2$, beide Eigenschaften übertrafen jene der Mörtel aus Schilfsandstein-Prüfkörpern.

Rüthener Grünsandstein entwickelt wegen seiner mineralogischen und strukturellen Eigenschaften einen guten Verbund mit HGZ-Faserstopfmörteln. Daher wurde der Versuchsumfang mit dieser Steinart begrenzt. Auf Anlage 64 sind einige Fotos von Mörtelplatten mit typischem Steinanhang angegeben.

6.1.4 Herdecker Ruhrsandstein- und Velpker Sandstein-Prüfkörper

Mit beiden Natursteinen wurden nur begleitend je 6 Doppelstein-Prüfkörper mit HGZ-Faserstopfmörtel hergestellt (siehe Anlage 63). Nach einstündiger kapillarer Befeuchtung hatten die Ruhrsandstein-Würfel wegen ihrer hohen Dichte (siehe Punkt 4) nur 0,3 M.-% Wasser aufgenommen. Der β_{HZ} -Mittelwert zwangsfrei erhärteter Prüfkörper (in Folientüten, Klima 20/65) betrug nur 0,02 N/mm². Für eine mechanische Haftung (Mikroverdübelungseffekt) fehlen dem Ruhrsandstein Makroporen, und für eine gute "Adhäsionshaftung" ist der HGZ-Faserstopfmörtel vermutlich nicht ausreichend klebeaktiv. Von der durchschnittlichen Wasserabgabe des Mörtels von 27 g nahm der Stein 20 g auf. Bei in einer Frischmörtelplatte von 81 cm² und 2 cm Dicke etwa enthaltenen 80 g Wasser dürfte der Mörtel dadurch noch nicht "verdurstet" sein, obwohl bereits konkave Bereiche in einer der Festmörteloberflächen von $\leq 0,25$ mm Tiefe festgestellt wurden. Die nachgewiesene größere Quellneigung dieser Steine sowie eine bei dichtem "Schalungsmaterial" an der Mörteloberfläche sich bildende Schlammeschicht dürften ebenfalls verbundschwächend wirken.

Bei einer kapillaren Wasseraufnahme Velpker Sandsteine bei einstündiger Befeuchtungsdauer von 0,8 M.-% entstand eine mittlere Haftzugfestigkeit 28 Tage alter Doppelstein-Prüfkörper mit HGZ-Faserstopfmörtel von 0,37 N/mm². Die Masseaufnahme der Steine bzw. die Masseabgabe des Mörtels betrugen bis zum Prüftermin durchschnittlich 5 g bzw. 11 g. Konkave Bereiche in einer der beiden Steinkontaktflächen des Mörtels wurden nicht oder kaum festgestellt. Die mittlere Druckfestigkeit der Mörtelplatten betrug für die Ruhrsandstein-Prüfkörper 58 N/mm² und für die Velpker Sandstein-Prüfkörper 68 N/mm²; die Mörteltrockenrohdichten lagen bei etwa 1,64 kg/dm³.

6.1.5 Haftungsvermittelnde Schlämmen für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

Um die Verbundfestigkeit zwischen Sander Schilfsandsteinen und HGZ-Faserstopfmörtel zu verbessern, wurden auf die mit Mörtel zu verfugenden Steinflächen mineralische bzw. polymermodifizierte mineralische Schlämmen mit einem Flachpinsel aufgetragen. Nach ver-

schiedenem Schlämmealter wurden die Fugen der Doppelstein-Prüfkörper mit HGZ-Faserstopfmörtel geschlossen (siehe Anlage 65). Trotz der Gefahr, daß die soeben auf Mörtelkontaktflächen aufgebraachte Schlämme vom eingestopften HGZ-Mörtel abgeschoben wird und sich im "unteren" Fugenbereich anreicherte, ergab das Verstopfen der Fugen "naß in naß" einen guten β_{HZ} -Mittelwert von $0,37 \text{ N/mm}^2$. War die Schlämme eine Stunde bzw. 24 Stunden alt, dann betrug der β_{HZ} -Mittelwert jener Prüfkörper nur noch $0,17 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,05 \text{ N/mm}^2$. Bei gleicher kapillarer Befeuchtung der Sander Schilfsandsteine von 1 Stunde und einer Schlämme aus nachgemahlenen HGZ-Komponenten erhöhte sich der β_{HZ} -Mittelwert auf $0,49 \text{ N/mm}^2$ (siehe Anlage 65). Diese günstigen Haftzugfestigkeiten von $0,37 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,49 \text{ N/mm}^2$ wurden bisher nur mit lang befeuchteten Sander Schilfsandsteinen bzw. tlw. nach Lagerung der Prüfkörper im Klima 20/99 erreicht.

Die Masseaufnahme der Steine bzw. die Masseabnahme der Mörtel dieser zwangfrei und unter Folie gelagerten Prüfkörper entsprachen einander; sie war etwa nur $2/3$ so groß wie an Prüfkörpern ohne Schlämme. Die etwa gleichgroße Masseänderung von Steinen und Mörtel beim Versuch mit Schlämme aus nachgemahlenen HGZ-Komponenten wie bei Prüfkörpern ohne Schlämme könnte durch erhöhte Kapillarität der erhärteten Schlammeschicht entstanden sein. Wegen des etwas höheren Wasseranteils des Mörtels einschließlich Schlämme waren die Prüffeuchten, die Druckfestigkeiten und die Dichten des Mörtels in Prüfkörpern mit "normaler" mineralischer Schlämme etwas größer als in Prüfkörpern ohne Schlämme (siehe Anlage 65). Bei Schlämme aus nachgemahlenen Komponenten verschlechterten sich die Festmörteleigenschaften nicht.

Die Verwendung mit Nafufill BB2 modifizierter Schlämme und mit Nafufill BB2 modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel ergab für zwangfrei in Folientüten und in 20/65 gelagerte Schilfsandstein-Prüfkörper einen β_{HZ} -Mittelwert von $1,12 \text{ N/mm}^2$. Wurde nur diese Schlämme mit nicht modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel bzw. nur BB2-modifizierter Mörtel ohne Schlämme zu Schilfsandstein-Prüfkörpern verarbeitet, dann betrug der β_{HZ} -Mittelwert nur $0,19 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,05 \text{ N/mm}^2$. Diese hohe Haftzugfestigkeit kann offenbar nur durch Vernetzung des im Naturstein eingedrungenen Polymers mit im Mörtel vorhandenen entstehen. Für diese β_{HZ} -Unterschiede ergab die Feuchtebilanz keinen erklärenden Hinweis; aus den Festmörteleigenschaften

ten waren nur abnehmende Prüffeuchten erkennbar. Eine der Mörteloberflächen wiesen bei diesen 2 Versuchen mit nur "einseitigem" Polymereintrag konkave Bereiche von $\leq 0,5$ mm Tiefe auf.

Ein weiteres Polymer - MC 13 (MC-Bauchemie) - wurde in Schlämme und Mörtel zugegeben. Damit hergestellte 6 Sander Schilfsandstein-Prüfkörper besaßen einen β_{HZ} -Mittelwert von nur $0,29 \text{ N/mm}^2$; die Mörtelplatten hatten aber keine konkaven Bereiche, obwohl aus dem Mörtel gemittelt etwa 46 g Wasser in den Stein gewandert war. Die Festmörteleigenschaften zeigten keine Besonderheiten.

Die Haftzugfestigkeit von Sander Schilfsandstein-Prüfkörpern erhöhte sich bei Verwendung mineralischer oder polymer-modifizierter Schlämmen u. U. deutlich. Fehlte Schlämme, blieb allein mit modifiziertem Mörtel der erstrebte Erfolg aus. Da das Einbringen von Schlämmen besonders bei schmalen Fugen problematisch wird, sollte dieser Lösungsweg Problemfällen vorbehalten bleiben. Für eine breite Anwendung des HGZ-Faserstopfmörtels ist bei "verbundträgen" Natursteinen nach einfacheren Lösungen zu suchen. Im Bedarfsfall müßte eine Anpassung der Mörtelrezeptur an den Naturstein erfolgen.

6.1.6 Polymer-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel für Sander-Schilfsandstein-Prüfkörper

Von der für diese Modifizierungsart bestehenden Polymervielfalt ergaben die orientierend untersuchten Dispersionen Mowiton LDM 3750 bzw. Mowilith LDM 6880 mittlere Haftzugfestigkeiten der Probekörper von $0,31 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,96 \text{ N/mm}^2$ (siehe Anlage 66). Der Zugabeanteil dieser copolymeren Acrylat-Dispersionen betrug 10 M.-% bzw. 12 M.-% Feststoff bezogen auf Bindemittelmasse. Erfahrungen fehlen, wie β_{HZ} bei reduzierter Zugabe abnimmt. Besonders Mowiton verfestigt sich erst durch ausreichendes Austrocknen des Mörtels. Obwohl der halbe Dispersionszusatz als Anmachwasser gerechnet wurde, ist die gemittelte Prüffeuchte beider Mörtel besonders niedrig. Bei Mowitonzusatz war abhängig von dieser Feuchte, einer vermuteten verzögernden Wirkung und der niedrigen Trockenrohdichte des Mörtels infolge Verdichtungsunwilligkeit die Festmörtel-Druckfestigkeit besonders niedrig. Die Schilfsandsteine nahmen aus beiden modifizierten Mörtelarten eine relativ große

Wassermenge auf (siehe Anlage 66), wobei Mowilith besser wasser-rückhaltend wirkte. Eine Geruchsbelästigung trat bei der Mörtel-verarbeitung auf. Die Zugabe von 0,4 M.-% Stabilisator ST 2 Addi-ment statt dieser Polymere war zur Verbesserung des Wasserrückhal-tevermögens des Mörtels etwas erfolgreich; die Haftzugfestigkeit blieb aber mit 0,24 N/mm² niedrig.

6.1.7 Methylcellulose-modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

Wegen der niedrigen Verbundfestigkeiten zwischen Sander Schilf-sandstein und HGZ-Faserstopfmörtel wurden nun anderweitige posi-tive Erfahrungen für Mörtel und Putze hinsichtlich der Wirkung von Methylcellulose (MC) übernommen, wodurch Konsistenz, Plastifizie-rung, Wasserrückhaltevermögen und Haftung z. B. eines Putzes auf komplizierten Untergründen verbessert werden kann. Ein Zusatz von Mowilith-Produkten kann die Haftung außerdem noch verbessern. Für Haft- und Maschinenputze auf Zement- oder Gipsbasis wird z. B. ein MC-Zusatz von 0,12 ... 0,23 M.-% eingesetzt /16/. Bei eigenen Ver-suchen wurden die MC-Typen Walocel MKX 15000 PP 11 (Wolff Walsrode AG, mittelfein), Tylose BA 3726 (Hoechst AG, sehr fein) und Tylose MH 2000 xp (Hoechst AG, grob), mit auf Bindemittelmasse bezogenen Anteil von $x_{MC} = < 0,003$ allein oder in Mischung verwendet.

Ein MC Walocel 15000-Zusatz ($x_{MC} = 0,0013$) ergab eine mittlere β_{HZ} der Prüfkörper von 0,34 N/mm². Bei Verdoppelung dieses Zusatzes betrug der β_{HZ} -Mittelwert 0,78 N/mm² (siehe Anlage 67). Der sonst krümelige HGZ-Mörtel wurde zunehmend kittähnlicher und ließ sich schneller in die Fugen einbringen, aber schwieriger verdichten. Ein Tylose BA 3726-Zusatz von $x_{MC} = 0,0026$ ergab nur einen β_{HZ} -Mittelwert von 0,41 N/mm². Die Prüffeuchtigkeit dieses Festmörtels blieb wegen höherer MC-Feinheit mit 14 M.-% größer als bei MC Wa-locel 15000-Zusatz mit 9 bis 10 M.-%. Ein mit MC-Mischung aus 85 % Walocel und 15 % Tylose modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel ($x_{MC} = 0,0026$) ergab eine Haftzugfestigkeit von 0,65 N/mm², womit sich der etwas geringere positive Einfluß dieser feinen MC-Tylose-Type erneut zeigte. Dieser β_{HZ} -Mittelwert von 0,65 N/mm² wurde bei ei-nem weiteren Versuch (Versuch 24/Anlage 67) mit hochdruckwasser-strahl-geschnittenen Steinen nochmals erhalten. Alle Prüfkörper

lagerten bis zur Prüfung am 28. Tag zwangfrei und austrocknungssicher in Folientüten bei 20/65 (Masseverluste Prüfkörper meist < 3 g).

Blieben die β_{HZ} -Prüfkörper bis zur Prüfung am 28. Tag fest in der Form eingespannt und austrocknungssicher im Foliensack bei 20/65, dann reduzierte sich der β_{HZ} -Mittelwert trotz erhöhtem MC-Zusatz von $x_{\text{MC}} = 0,0032$ für MC Walocel 15000 PP 11 bzw. bei Mischung aus 85 % MC Walocel 15000 PP 11 und 15 % MC Tylose BA 3726 (mit Hochdruckwasserstrahl geschnittene Schilfsandsteine) etwa auf die Hälfte der Haftzugfestigkeit bei zwangfreier Lagerung (0,45 N/mm² bzw. 0,40 N/mm²). Bei einem weiteren Versuch mit eingespannter Lagerung der Prüfkörper erfolgt die Modifizierung des Mörtels mit der gröberen MC Tylose MH 2000 XP ($x_{\text{MC}} = 0,0032$), der β_{HZ} -Mittelwert betrug nur 0,19 N/mm².

Diese Untersuchungen ergaben erste Erkenntnisse über die Erhöhung der Haftzugfestigkeit von Probekörpern aus Schilfsandsteinen und HGZ-Faserstopfmörtel, der mit Methylcellulose modifiziert wurde.

Diese MC-Zusätze reduzierten vergleichsweise zu nicht modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel die Trockendruckfestigkeit und Trockenrohdichte des HGZ-Faserstopfmörtels, was auf höheren Luftporengehalt, schlechtere Verdichtungsneigung und Verzögerung der Hydrationsreaktionen hinweisen dürfte (siehe Anlage 67). Trotz der "wasserrückhaltenden" Wirkung der Methylcellulosen saugten die Schilfsandsteine fast unvermindert viel Wasser aus dem MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel ab. Da dies an insgesamt 48 β_{HZ} -Einzelprüfkörpern beobachtet wurde und durch nachträgliche Wasserübergangsuntersuchungen zwischen Sander-Schilfsandsteinen und nicht modifiziertem bzw. MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel bestätigt wurde (siehe Punkt 7, Anlagen 71 und 72), kann die Wirkungsweise der Methylcellulose im HGZ-Faserstopfmörtel noch nicht abschließend bewertet werden.

Geringe MC-Zusätze zum HGZ-Faserstopfmörtel ergaben bei Sander Schilfsandstein-Prüfkörpern im Prüfalter von 28 Tagen akzeptable β_{HZ} -Mittelwerte, wie sie bisher nur an Prüfkörpern aus Elmkalk- bzw. Grünsandstein mit nicht modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel erzielt wurden. Dadurch reduzierte sich die Mörteldichte und

-druckfestigkeit etwas. Der Übergang von Mörtelanmachwasser an den Schilfsandstein konnte durch MC-Zusätze zwar etwas gemindert, aber nicht so stark wie bei Elmkalk- bzw. Grünsandstein-Prüfkörpern reduziert werden.

6.1.8 Schrumpfkompensierter HGZ-Faserstopfmörtel für Sander-Schilfsandstein-Prüfkörper

Zur Haftungsverbesserung zwischen Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel und Vermeidung haftungsmindernder konkaver Einbrüche auf einer Festmörteloberfläche sollte dieser in seiner plastischen Frühphase, in der wegen Wasserübergangs in den Naturstein eine entsprechende Dickenreduzierung der Mörtelschicht entstehen kann, mittels reaktionsbedingter Quellung eine schrumpf- und schwindbedingte Volumenabnahme kompensieren können. Diese bei Hydratationsbeginn erforderliche Reaktion muß exakt beherrschbar sein und darf am Festmörtel später nicht mehr auftreten. Für erste orientierende Untersuchungen wurden von der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung (WKI) dem derzeitigen Wissensstand gemäß mineralisch modifizierte HGZ-Faserstopfmörtel ohne MC hergestellt und zu Sander Schilfsandstein-Prüfkörpern verarbeitet.

Mit einem Spezial-Faserstopfmörtel auf Zementbasis (33 M.-% PZ) ergaben sich bei zwangfreier bzw. fest eingespannter Lagerung der Schilfsandstein-Prüfkörper etwa gleich große β_{HZ} -Mittelwerte von 0,80 N/mm² (siehe Anlage 68). Doppelsteinprüfkörper unter Verwendung eines TEZ-modifizierten HGZ-Faserstopfmörtels besaßen β_{HZ} -Mittelwerte von 0,15 N/mm² (zwangfreie Lagerung) bzw. 0,61 N/mm² (eingespannte Lagerung), wobei diese Ergebnisse durch einsetzende Erhärtung der älteren ersten Mörtelcharge und auch subjektiv beeinflusst wurden, wie die Festmörtelrohichte und -druckfestigkeit belegte. Beim Wiederholungsversuch wurde dieser Mörtel verzögert; die Verarbeitungszeit war aber kaum länger. Die β_{HZ} -Mittelwerte der zwangfrei bzw. eingespannt gelagerten Prüfkörper aus Sander Schilfsandstein waren mit 0,60 N/mm² fast gleich. Bei geringfügig längerer Verarbeitungszeit könnten noch etwas günstigere Haftzugwerte eintreten. Die Bruchflächen eingespannter Prüfkörper verliefen anteilig im Naturstein (siehe Anlage 64), während sie bei zwangfrei gelagerten nur in der Grenzfläche Mörtel/Naturstein auftraten.

Diese β_{HZ} -Mittelwerte entsprachen etwa denen mit Polymer- bzw. MC-modifizierten HGZ-Faserstopfmörteln erzielten (siehe Anlagen 66 und 67); diese Untersuchungen sind weiterzuführen. Die Prüffeuchte des Spezial-Faserstopfmörtels war niedriger als die der HGZ-Faserstopfmörtel. Auffallend war die niedrige Wasseraufnahme der Schilfsandsteine; offenbar konnte durch die schnellere Mörtelerhärtung nur 1/3 bis 1/2 der sonst abgewanderten Wassermenge in die Steine gelangen. Konkave Einbrüche im Mörtel zwangfrei gelagerter Probekörper entstanden in geringem Umfang. An eingespannt gelagerten Proben traten diese kaum auf, wobei der Bruch bei diesen auch anteilig im Stein verlief.

6.2 Alternative mineralische faserfreie Mörtel

Der neuentwickelte HGZ-Faserstopfmörtel "konkurriert" mit einigen z. Zt. für die Instandsetzung von Denkmalbauten eingesetzten Verfugmörteln. Die für HGZ-Faserstopfmörtel von der Fraunhofer Arbeitsgruppe für Holzforschung (WKI) festgestellte Kalk- und Sulfatbeständigkeit, die für C_3A -haltige Festmörtel auf Zementbasis nicht gilt, ist für seine Beständigkeit und Verträglichkeit mit Altmörteln äußerst wichtig; im Verbundverhalten sollte er dem alternativer Mörtel mindestens entsprechen. Deshalb wurde das Verbundverhalten folgender mineralischer Mörtel mit Sander Schilfsandsteinen orientierend untersucht, um die Verbundqualität des HGZ-Faserstopfmörtels vergleichend beurteilen zu können:

- Tubag Traß-Kalk-Mörtel,
- Tubag Restauriermörtel für gipshaltiges Mauerwerk,
- Zentrival FM 10 bzw. FM 20 (polymer vergüteter hydraulisch abbindender Fugenmörtel, MC-Bauchemie) und
- gemagerter HGZ-Mörtel

6.2.1 Tubag Traß-Mörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

Nach den Ergebnissen auf Anlage 69 ergab Tubag Traß-Kalk-Mörtel mit einem Wasseranteil $W^* = 0,096$ (stopfbare Konsistenz) bzw. 0,14 (weichere Konsistenz) bei zwangfreier Lagerung der Schilfsandstein-Prüfkörper unter Folie einen β_{HZ} -Mittelwert von 0,13 N/mm²

stein-Prüfkörper unter Folie einen β_{HZ} -Mittelwert von 0,13 N/mm² bzw. von 0,03 N/mm². Diese geringere Haftzugfestigkeit entstand offenbar infolge eines zu hohen Luftporenanteils des schlechter verdichtbaren weicheren Mörtels. Die Trockenrohdichte und die Trocken-Druckfestigkeit des Festmörtels blieben bei $W^* = 0,14$ deutlich kleiner als bei $W^* = 0,096$; "subjektiver" Einfluß kann ausgeschlossen werden. Der β_{HZ} -Mittelwert der 6 Prüfkörper aus Sander Schilfsandstein und Tubag Restauriermörtel für gipshaltiges Mauerwerk (Wasseranteil $W^* = 0,14$) erreichte nur 0,09 N/mm².

Die Prüffeuchtigkeit der Mörtel betrug < 4,5 M.-%, verglichen mit HGZ-Faserstopfmörteln ein sehr niedriger Wert, der auf Hydrationsstörungen im Mörtel infolge Wassermangels hinweisen dürfte. Da gemäß Rezeptur im Frischmörtel der Fuge nur etwa 40 g Wasser enthalten waren, lassen die mittleren Masseänderungen für Steine und Mörtel Verbundstörungen erwarten. Wassermangel im Mörtel und die Verhinderung des CO₂-Zutritts zum kalkreichen Mörtel wegen Lagerung der Prüfkörper unter Folie dürften zur niedrigen Haftzugfestigkeit beigetragen haben.

An Prüfkörpern mit Tubag Restauriermörtel für gipshaltiges Mauerwerk erfolgte der Bruch bei der β_{HZ} -Prüfung meist im Mörtel. Beim Ablösen der Mörtelplatten von den Steinen zerbrachen diese, so daß sie kaum auf konkave Einbrüche überprüft werden konnten. Die Mörtelplatten aus Tubag Traß-Kalk-Mörtel mit $W^* = 0,14$ besaßen konkave Einbrüche von $\leq 0,10$ mm Tiefe, an den Platten mit $W^* = 0,096$ waren dagegen keine feststellbar.

6.2.2 Zentrival-Mörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

Zentrivalmörtel (MC-Bauchemie) enthalten Zement, mineralischen Zuschlag von etwa 1 : 5 (Körnung 0 bis 1 mm : FM 10 bzw. 0 bis 2 mm : FM 20) und etwa ≤ 10 % Polyvinylacetat. Händig mit Zentrival FM 10-Mörtel (Wasseranteil $W^* = 0,14$) verfugte Schilfsandstein-Prüfkörper ergaben nach 7, 28 bzw. 90 Tagen β_{HZ} -Mittelwerte von 0,70 N/mm², 0,93 N/mm² bzw. 1,79 N/mm² (ab 8. Tag im Klima 20/65 zwangfrei ohne Abdeckung). Werden die während der Zementhydratation eintretenden Schrumpf- und Schwindvorgänge (Wasserabgabe an Naturstein) sowie Erfahrungen von anderen Schilfsandstein-Prüfkör-

pern berücksichtigt, so könnte bei eingespannter Lagerung der Prüfkörper eine Minderung der Haftzugfestigkeit auf halb so große Werte eintreten. Damit wurde erstmals für Schilfsandstein-Prüfkörper festgestellt, daß auch mit diesen Steinen und einem geeigneten Mörtel (vermutlich aber unzureichend sulfatbeständig) hohe Haftzugfestigkeiten erreicht werden können (siehe Anlage 69).

Wurden die Fugen der Schilfsandstein-Prüfkörper nach dem Trockenspritzverfahren mit Zentrival FM 20-Mörtel gefüllt, dann betrugen ihre β_{HZ} -Mittelwerte bei gleicher Lagerung wie händig gestopfte nur $\leq 0,20 \text{ N/mm}^2$; bis zum 90. Tag war bei Lagerung im Klima 20/65 keine β_{HZ} -Zunahme erkennbar. Gleichzeitig hergestellte und im Klima 20/99 gelagerte Prüfkörper zeigten vom 28. Tag bis 90. Tag eine geringe Erhöhung der Haftzugfestigkeit (siehe Anlage 69). Ursache für diese geringe Verbundfestigkeit waren vermutlich zum einen Wassermangel und zum anderen durch das Spritzen entstandene Inhomogenitäten im Mörtel. Wegen der geringen Zugfestigkeit des gespritzten Mörtels trat der Bruch bei der β_{HZ} -Prüfung meist im Mörtel ein, so daß die Mörteloberflächen hinsichtlich konkaver Einbrüche nicht untersucht werden konnten. Die Eigenschaften des gespritzten Zentrival-Mörtels sind auf Anlage 22 bis 24 angegeben.

6.2.3 Gemagerter HGZ-Mörtel für Sander Schilfsandstein-Prüfkörper

Schwach gemagerter HGZ-Mörtel ohne Fasern ($x_s = 0,5$) von stopfbarer steifer Konsistenz ($W = 0,31$) führte in Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander-Schilfsandstein bei zwangsfreier bzw. eingespannter Lagerung zu β_{HZ} -Mittelwerten von $0,19 \text{ N/mm}^2$ bzw. $0,28 \text{ N/mm}^2$ (siehe Anlage 69). Der Frischmörtel der Mörtelplatten enthielt etwa 75 g Anmachwasser, davon sind gemäß Feuchtigkeitsbilanz etwa 52 g aus dem Mörtel abgeführt worden. Die Mörtelplatten besaßen Schwindrisse und teilweise konkave Einbrüche; sie konnten z. T. nicht weiter untersucht werden, da der Bruch auch im Mörtel erfolgte und die "Platten" bei der Abnahme vom Stein in mehrere Teile zerbrachen. Wegen der niedrigen Haftzugfestigkeiten wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt; die Magerung und das Wasserrückhaltevermögen des Mörtels waren zu gering. Eine höhere Magerung des Mörtels dürfte jedoch die Verbundfestigkeit nicht verbessern.

7. Kapillare Aufnahme von Anmachwasser des HGZ-Faserstopfmörtels durch Natursteine

Für eine akzeptable Langzeit-Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Naturstein muß u. U. das Wasserrückhaltevermögen (WRV) des Mörtels dem kapillaren Saugverhalten des Natursteins angepaßt werden, damit trotz hoher Stein-Kapillarität der Mörtel in Steinkontakt ohne schädigenden Wasserdéfizit erhärten kann. Die Prüfung beider Eigenschaften für einen konkreten Verbundfall ist problematisch, weil bekannte Prüfmethoden offenbar die praxisrelevanten Effekte nur unzureichend berücksichtigen: Die Bewertung des z. B. 5 min lang gegen Pappe ermittelten WRV-Wertes des Mörtels (DIN 18 555 Teil 7) dürfte hinsichtlich der realen Stein-Kapillarität ebenso ungenau bleiben wie die verbundtechnische Bewertung einzelner Natursteine bezüglich ihres Saugverhaltens gegen Mörtel mit dem Wasseraufnahmekoeffizienten, wie bisherige Versuche bestätigten. Je nach Größe des am Mörtel anliegenden saugfähigen Steinvolumens bzw. der Steinhöhe kann die Entwicklung einer hohen und dauerhaften Verbundfestigkeit zwischen Naturstein und HGZ-Faserstopfmörtel verschieden beeinflußt werden.

Eine verlässlichere, aber aufwendigere Methode zur Bestimmung der vom Naturstein aus dem Mörtel abgesaugten Wassermenge und auch der Verbundfestigkeit im jungen Mörtelalter besteht im Zerlegen von 2-Steinprüfkörpern im verschiedenen Alter und der Bestimmung der aufgenommenen Wassermenge der Steine, der jeweiligen Mörtelfeuchtigkeit und eventuell auch der Bruchlast. Bei ähnlichen von /31/ durchgeführten Versuchen wurde z. B. festgestellt, daß trockene Hochlochziegel ≤ 2 Stunden und Kalksandsteine bis zu 6 Stunden Wasser aus einem Mörtel saugten. Die zur Beurteilung der Stein-Saugfähigkeit früher empfohlene "Haller-Zahl" (g/dm^2 , 1 min kapillares Saugen) wurde bei diesen Versuchen für eine Steinbewertung als ungeeignet erkannt; dazu sind längere Saugzeiten erforderlich. Die Erläuterung eigener Versuche erfolgt auf Anlage 70; die Versuchsergebnisse sind auf den Anlagen 71 bis 78 dargestellt.

7.1 Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel

Die gemittelte Wasseraufnahme beidseitig am Mörtel anliegender Schilfsandsteine betrug bei 48 Stunden Versuchsdauer für trockene Steine 66 g/dm^2 und für kapillar vorbefeuchtete Steine 52 g/dm^2 . Danach fand offenbar keine nennenswerte Wasseraufnahme der Steine mehr statt (siehe Anlage 71). Zwischen diesen beiden "Grenzlinien" werden zu erwartende Wasseraufnahmewerte bei geringerer Vorbefeuchtung liegen. Eine Stunde lang kapillar vorbefeuchtete Steine entnahmen dem Mörtel etwa 14 g/dm^2 weniger Wasser als trockene Steine. Da diese Mörtelplatten etwa 85 g Wasser enthielten, kann etwa 75% dieses Anteils durch die hohe Saugaktivität dieser Steine aus dem Mörtel entfernt werden, wodurch sich das Volumen des etwa 15 Stunden lang plastischen Mörtels bzw. die Mörtelplattendicke verringern wird. Dieses frühe "Schwinden" des Mörtels wegen Wasserabgabe an die Steine sowie eine kleine Volumenreduzierung infolge Schrumpfung ist einer guten Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Stein dann abträglich, wenn lokale Einbrüche im Mörtel die Haftfläche reduzieren und ein Wasserdefizit für die Bindemittelhydratation entsteht.

Die Mörtelfeuchtigkeit verringerte sich kontinuierlich, wobei wegen der prozentualen Darstellung der Einfluß beider Vorbefeuchtungsarten der Steine weniger deutlich wurde. Mörtel, die mit trockenen Steinen verarbeitet wurden, besaßen eine geringere Feuchtigkeit (siehe Anlage 71). Beim Zerlegen der bis 96 Stunden alten 2-Steinprüfkörper wurden für beide Vorbefeuchtungsarten nur geringe Verbundfestigkeiten subjektiv festgestellt; in einem Fall fiel beim Anheben des Prüfkörpers am Oberstein der Unterstein ab, während bei etwas jüngeren Prüfkörpern offenbar der Wasserfilm mittrug.

7.2 Sander Schilfsandstein und MC-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel

Durch Zugabe von $0,25 \text{ M.-%}$ Methylcellulose (Walocel MKX 15000 PP 11) auf Bindemittel bezogen wurde das Wasserrückhaltevermögen (WRV) des Mörtels verbessert (siehe Anlage 72). Diese Zugabemenge

verbesserte auch die Haftzugfestigkeit deutlich (siehe Punkt 6.1.7). Trotzdem wurde dadurch die typische Kapillarität dieser Schilfsandsteine nur abgeschwächt, jedoch nicht völlig verändert. Beim Vergleich beider Mörtelarten mit Schilfsandsteinen für gleiche Prüfalter blieb die Massezunahme der Steine mit MC-modifiziertem Mörtel etwas niedriger; z. B. nach 24 h etwa 28 g/dm² bzw. 45 g/dm² für befeuchtete bzw. trockene Steine und MC-modifizierten Mörtel gegenüber 37 g/dm² bzw. 53 g/dm² für beide Steinvorbefeuchtungen und nicht modifiziertem Mörtel (siehe Anlagen 72 und 71).

Die Feuchtigkeiten des MC-modifizierten Mörtels waren bei bestimmter Lagerungsdauer etwas höher als die entsprechenden des nicht modifizierten Mörtels. Die Feuchtigkeiten lagen bei Verwendung trockener Steine wie schon bei Verwendung des nicht modifizierten Mörtels niedriger als die bei Einsatz vorbefeuchteter Steine. Ein Einfluß der Methylcellulose auf das WRV wurde deutlich. Nach 3 Tagen war zum Zerlegen der Doppelsteinprüfkörper aus trockenen Steinen ein etwas höherer Kraftaufwand erforderlich als für die aus vorbefeuchteten Steinen hergestellten.

7.3 Rüthener Grünsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel

Rüthener Grünsandstein mit höchster kapillarer Saugfähigkeit aller untersuchten Natursteine hatte bei für alle Steine gewählter kapillarer Befeuchtungsdauer von 1 Stunde eine am Würfel außen erkennbare Steighöhe des Wassers von 7 bis 10 cm, die reichlich doppelt so groß war wie an Schilfsandsteinen. Die vorbefeuchteten Grünsandsteinpaare waren fast völlig durchfeuchtet (Wasseraufnahme 136 g bis 246 g). Später trat besonders an Prüfkörpern mit höchster Wasseraufnahme der Steine ein geringerer Teil Wasser der Schwerkraft folgend wieder aus, wodurch die Massen benachbarter Prüfkörper aus trockenen Steinen evtl. beeinflußt wurden. Die Probekörper für das Prüfalter von 48 Stunden wurden daher wiederholt. Da dies für ein Prüfalter von 72 Stunden nicht möglich war, wurden diese Meßwerte nicht in die Kurven einbezogen (siehe Anlage 73). Wegen hoher Wasseraufnahme beim Vorbefeuchten trat später bei Mörtelkontakt keine nennenswerte Massezunahme der Steine durch abgesaugtes Mörtelanmachwasser ein. Dagegen erhöhte sich die Masse

trockener Steine während der 4tägigen Meßdauer, ohne jedoch die hohe Wasseraufnahme trockener oder auch vorbefeuchteter Sander Schilfsandsteine zu erreichen (siehe Anlagen 71 und 73). Offenbar wegen der kapillaren Saugfähigkeit bzw. der Sättigung vorbefeuchteter Grünsandsteine verliefen die Massenänderungen trockener bzw. vorbefeuchteter Steine nicht gleichsinnig wie bei anderen Steinarten.

Die geringfügige Änderung der Mörtelfeuchtigkeit im Steinkontakt war ähnlich wie bei Elmkalkstein und unterschied sich deutlich von der Tendenz bei Sander-Schilfsandstein, wobei trockene Steine immer niedrigere Mörtelfeuchtigkeiten ergaben als vorbefeuchtete. Die mit zunehmendem Prüfalter gering abnehmende Mörtelfeuchtigkeit, auch für Prüfkörper aus vorbefeuchteten Steinen, deutet auf eine gewisse Wasseraufnahme durch die Steine hin.

Beim Zerlegen der Prüfkörper und Ablösen der Mörtelplatten war im Vergleich mit Schilfsandstein-Proben bereits frühzeitig eine höhere Verbundfestigkeit zwischen Mörtel und Steinen eingetreten. Bereits nach 24 Stunden war dazu und besonders bei Prüfkörpern aus trockenen Steinen ein gewisser Kraftaufwand erforderlich; der Bruch verlief zu $\geq 70\%$ der Haftfläche im Mörtel. 48 Stunden alte Prüfkörper mußten bereits mit Hammer und Spachtel zerlegt werden, der Bruch verlief noch im Mörtel (etwa $\geq 85\%$ der Steinflächen mit Mörtelanhang). Mindestens 3 Tage alte Prüfkörper ließen sich nur noch mit Hammer und Meißel zerlegen. Der Bruch zwischen Mörtel und Stein erfolgte ab jetzt im Grünsandstein. Die Mörteloberflächen waren etwa mit $\geq 85\%$ Steinanhang von ungefähr ≤ 3 mm Dicke bedeckt. Diese gute Verbundfestigkeit entstand offenbar durch die besondere Porenstruktur des Grünsandsteins und durch einen begrenzten kapillaren Mörtelwasserentzug in haftungsverbessernder Größenordnung.

7.4 Elmkalkstein und HGZ-Faserstopfmörtel

Mit zunehmender Kontaktdauer dieser Steine mit nicht modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel erhöhte sich die Masse beidseitig am Mörtel anliegender Steine bis etwa zur 24. Stunde für trockene Steine,

ohne daß die hohen Wasseraufnahmen trockener bzw. vorbefeuchteter Schilfsandsteine erreicht wurden (siehe Anlagen 71 und 74). Danach war keine weitere Massezunahme festzustellen. Die spätere Masseabnahme der Steine dürfte zufällig wegen geringerer kapillarer Saugfähigkeit dieser Steine entstanden sein, anderenfalls würde das eine Rückwanderung von Wasser aus den Steinen in den Mörtel bedeuten, die aber aus den Mörtelfeuchtigkeitsverläufen nicht erkennbar war (siehe Anlage 74). Die vor der Prüfkörperherstellung kapillar befeuchteten Steine entnahmen wie erwartet dem Mörtel weniger Wasser als trockene Steine. Der Mörtelfeuchtigkeitsverlauf für trockene und vorgefeuchtete Steine entsprach dem des Grünsandsteines und nicht dem deutlich fallenden der Schilfsandstein-Prüfkörper. Der Einfluß unterschiedlich feuchter Steine auf die Mörtelfeuchtigkeit blieb wie beim Grünsandstein gering. Trockene Steine nahmen aus dem Mörtel maximal etwa 30 g/dm² und vorbefeuchtete etwa 20 g/dm² Wasser auf. Die Mörtelfeuchtigkeit reduzierte sich von anfänglich 38 M.-% auf etwa 20 M.-%.

Mit diesen Ergebnissen wurden die Feststellungen der Feuchtebilanzen an Doppelsteinprüfkörpern bestätigt. Sander Schilfsandsteine saugten deutlich mehr und länger Wasser aus dem HGZ-Faserstopfmörtel als Elmkalk- bzw. Rüthener Grünsandsteine. Wurde durch MC-Zugabe das WRV des Mörtels erhöht, blieb die Wasseraufnahme der Schilfsandsteine zwar geringer, ohne jedoch ihre typische Tendenz zu verändern und ohne die geringen Wasseraufnahmen trockener oder vorbefeuchteter Elmkalk- bzw. Grünsandsteine zu erreichen (siehe Anlagen 75 und 76).

MC-freie Mörtelplatten zwischen trockenen bzw. vorbefeuchteten Schilfsandsteinen reduzierten besonders ab der 6. Stunde ihre Feuchtigkeit stärker als zwischen anderen Steinarten; nach 4 Tagen war sie von anfänglich 38 M.-% auf etwa 10 bis 15 M.-% gefallen. MC-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel erreichte trotz besserem WRV zwischen Schilfsandstein nicht die höheren Mörtelfeuchtigkeiten der Elmkalkstein- bzw. Grünsandstein-Prüfkörper (siehe Anlagen 77 und 78). Weitere Versuche mit retardierenden Mitteln sind erforderlich, um HGZ-Faserstopfmörtel allen kapillaren Natursteineigenschaften optimal anpassen zu können. Ebenfalls sollte vergleichend der Einfluß von Natursteinmehlen gleicher Feinheit auf die

Festigkeit und Längenänderung von HGZ-Prismen untersucht werden, damit der chemische Einfluß der Natursteine auf die HGZ-Bindemittelhydratation deutlich wird und der Einsatz von Abbindebeschleunigern getestet werden kann.

8. Unbehinderte thermisch-hygrische Dehnungen von Doppelstein-Prüfkörpern

In einer ersten Meßetappe wurden an 38 Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel ($W/BM = 0,5$; $x_F = 0,05$) über etwa 9 Monate hygrisch bedingte Dehnungen bei wechselnder Lagerung im Klima 20/65 und 20/99 bestimmt. Dabei sind die Vorbefeuchtungsdauer der Steine (1 und 4,5 Stunden getaucht) und die Zusammensetzung des HGZ-Bindemittels (78/15/7 oder 85/10/5) variiert worden. Zwei Tage nach ihrer Herstellung wurden die Prüfkörper ausgeschalt, am Stein und über die Fugen Meßstrecken aus aufgeklebten Meßplättchen für die Bestimmung der Dehnungen mit dem Setzdehnungsmesser angebracht und die Erstmessungen ausgeführt. Bis zum Alter von 7 Tagen wurde nachbehandelt (Zweitmessung; siehe Anlagen 79, 80, 82 und 86). An 15 Proben davon wurden außer der Verfugseite alle übrigen Oberflächen mit einem Kunststoffilm (Euralan FK 22, Deitermann) beschichtet, um Meßergebnisse bei einem Feuchtewechsel nur über eine offene Fläche wie bei Mauerwerk zu erhalten.

Einige Prüfkörper lagerten zuerst im Klima 20/65, andere zuerst im Klima 20/99. Waren die Massen- bzw. Längenänderungen konstant, dann wurde das Lagerungsklima gewechselt. Während der Meßdauer zerbrachen einige Proben an der Fuge; an anderen wurde nach einiger Zeit im Klima 20/65 wieder eine "Verlängerung" einzelner Meßstrecken festgestellt, was auf eine beginnende Lockerung des Verbundes zwischen Mörtel und Schilfsandstein hinwies. Daher sind die Dehnungen nur bis zur sinnwidrigen Tendenzänderung ausgewertet worden, eine Auswertung der Massenänderungen erfolgte nicht.

In einer weiteren Meßreihe wurden an 12 Doppelsteinprüfkörpern aus MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel ($W/BM = 0,4$; $x_F = 0,05$) und Sander Schilfsandstein sowie Rühener Grünsandstein entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

8.1 Prüfkörper aus HGZ-Faserstopfmörtel und Schilfsandstein

Anlage 80 enthält die Ergebnisse. Die für jede Probenseite gemittelten Verformungen wurden beispielhaft auf Anlage 81 zeitabhängig dargestellt. Von 21 Proben erreichte keine das Ende der etwa 4-monatigen Lagerungsdauer im Klima 20/65, ohne daß bereits ab etwa 20 Tagen - bei einigen Proben auch erst später und besonders zuerst an den am "Stopfende" angeordneten Meßstrecken Nr. 1 bis Nr. 3 und Nr. 8 - nach anfänglichem Schwinden eine Verlängerung der Meßstrecken eintrat. Wegen der bei diesem Stoffsystem bestehenden geringen Haftzugfestigkeit wird dieses "Quellen" als beginnende Verbundzerstörung gedeutet. Nur bei dem reaktiveren HGZ-Bindemittel 78/15/7 und 4,5 Stunden getauchten Schilfsandsteinen trat diese Verbundzerstörung etwas später ein, weitere "Tendenzen" sind sehr unscharf (siehe Anlage 81). Das maximale Schwindmaß über die Mörtelfugen schwankte bei Eintritt der Verbundstörung zwischen 1,2 und 2,0 mm/m; war der Verbund lokal intakt, dann wurden auch etwa 3 mm/m erreicht. An Proben aus 4,5 Stunden getauchten Steinen und Mörtel mit dem HGZ-Bindemittel 78/15/7 waren die maximalen Schwindmaße mit 0,7 mm/m bis 1,2 mm/m deshalb so gering, weil bei allen Proben und Meßstrecken über die Fugen eine zeitlich begrenzte Zunahme der Meßstreckenlänge ab der Zweitmessung - vermutlich infolge verstärkter Ettringitbildung - auftrat. Dieses Quellen war weniger deutlich bei gleichem Bindemittel und einstündig getauchten Steinen und trat kaum auf bei 4,5 Stunden getauchten Steinen und HGZ-Bindemittel 85/10/5. An versiegelten Prüfkörpern ergaben sich gleiche Feststellungen (siehe Anlage 82).

An 4,5 h bzw. 1,0 h lang getauchten Steinen wurden Schwindwerte von etwa $\geq 0,5$ mm/m bzw. $\leq 0,5$ mm festgestellt. Zuerst im Klima 20/99 gelagerte Proben hatten über die Fugen ein gemitteltes Quellmaß von etwa 0,23 mm/m; im anschließenden Klima 20/65 wurde nach etwa 5 Monaten dort ein mittleres Schwindmaß von 2,1 mm/m festgestellt.

8.2 Versiegelte Prüfkörper aus HGZ-Faserstopfmörtel und Schilfsandstein

An versiegelten Prüfkörpern mit nur einer Austrocknungsfläche wurde im Klima 20/65 festgestellt (siehe Anlagen 82 bis 85), daß

- an den Meßstrecken der nicht versiegelten Fläche A anfänglich die größten Schwindwerte entstanden,
- die Meßstrecken der der Fläche A benachbarten versiegelten Flächen B und D einen ähnlichen Schwindverlauf zeigten,
- sich die Meßstrecken der "hinteren" versiegelten Fläche C am langsamsten und gleichmäßig änderten; nach etwa 160 Tagen waren die maximalen Schwindwerte für alle Flächen mit 1,5 mm/m bis 2,3 mm/m ähnlich groß. Ein Beharrungszustand war oft noch nicht eingetreten.
- bei einem HGZ-Bindemittel 78/15/7 und bei 4,5-stündiger Befeuchtung der Schilfsandsteine durch Tauchen am jungen HGZ-Faserstopfmörtel Quellen auftrat, so daß die der Erstmessung folgenden Messungen positive Dehnwerte besaßen (siehe Anlage 84).

Im Klima 20/65 betrug das maximale Schwindmaß der Steine bei einer Tauchdauer von 1,0 h bzw. 4,5 h etwa 0,4 bzw. 0,8 mm/m. Das maximale Schwindmaß über die Mörtelfuge (Streckenlänge Mörtel etwa 50 ... 70 %; Restlänge Stein) ist vom Erstmessungstermin, der Bindemittelrezeptur, Steinfeuchtigkeit, Meßstreckenlage und Verbundfestigkeit abhängig. An der Fläche A wurden hierzu Werte zwischen 0,6 und 2,3 mm/m gemessen.

Wurden die Proben am Nachbehandlungsende dem Klima 20/65 ausgesetzt, dann begann für die Meßstrecken der Probenflächen A bis D unterschiedlich intensiv trocknungsbedingtes Schwinden (siehe Anlage 83). Später entstand nur an Meßstellen der Fläche A ein Quellen, das wegen fehlender Wasserzufuhr eine beginnende Verbundstörung anzeigte. Dem Schwinden des Mörtels folgten, solange die Verbundfestigkeit bestand, die ebenfalls schwindenden Steine, wodurch im Mörtel und an der Grenzfläche Zugspannungen entstanden.

Überstiegen diese Spannungen lokal die Haftzugfestigkeit zwischen Stein und Mörtel, dann löste sich dort der Verbund und die Längen hier angeordneter Meßstrecken wurden größer. Auch Rückstellkräfte der Kunststoffversiegelung könnten zur Verbundschädigung und Flankenablösungen beigetragen haben.

Frühzeitige Erstmessung von Proben aus 4,5 Stunden lang getauchten Steinen und Mörtel aus HGZ-Bindemittel 78/15/7 bei Nachbehandlung bis zum 7. Tag ergab im Klima 20/65 eine Zunahme aller Meßstreckenlängen über die Fuge, besonders für die versiegelten Flächen (siehe Anlage 84). Da von "außen" keine Wasserzufuhr erfolgte, dürfte dieses Quellen gemäß Feuchteverteilung im Stein vermutlich durch besonders am äußeren Fugenrand stattgefundene stärkere Ettringitbildung entstanden sein, wozu wahrscheinlich eine höhere Mörtelfeuchte wegen geringeren Wasserentzugs an den Steinrandzonen beitrug. Die Meßstrecken über die Fugen der versiegelten Flächen B bis D ergaben deshalb höhere Quellenwerte als die an Fläche A, weil sie keiner teilweisen Trocknung unterlagen. Nach 17 Tagen hatten die Längen der Fugen-Meßstrecken der Fläche A wieder die Bezugslänge l_0 erreicht; für die der Flächen B bis D dauerte das etwa 82 Tage. Nach etwa 125 Tagen entstand über die Fuge der Fläche A ein konstanter "Endschwindwert" von 0,7 mm/m; dagegen waren an den Flächen B bis D nach 166 Tagen noch keine Endwerte entstanden (siehe Anlage 84). Bei nur einstündigem Tauchen der Steine trat dieses anfängliche Quellen nur an den "vorderen" Meßstellen Nr. 1 bis Nr. 3 und Nr. 8 bei 2 von 3 Proben auf.

Proben mit Mörtel der HGZ-Rezeptur 85/10/5 und 4,5-stündigem Tauchen der Steine zeigten dieses Quellen nicht. Dieses anfängliche Quellen wurde auch an gleichen nichtbeschichteten Doppelstein-Schwindproben festgestellt (siehe Anlage 80).

Im Klima 20/99 fand eine geringe Feuchteaufnahme der Proben statt. An allen Meßstrecken wurden Längenzunahmen bis zur 3. Woche von $\leq 0,5$ mm/m festgestellt (siehe Anlage 85). Wurden die Proben nach Erreichen des "Gleichgewichtes" dem Klima 20/65 ausgesetzt, dann verkürzten sich alle Meßstrecken um 1,5 mm/m nach 100 Tagen. Für versiegelte Flächen war dann noch kein Endschwindmaß erreicht, während die Verkürzung an Fläche A ausklang. An den Schilfsand-

steinen war schon nach 20 Tagen eine konstante Verkürzung von etwa 0,5 mm/m eingetreten.

Augenscheinliche prüffähige, im Klima 20/65 gelagerte Proben ergaben im Alter von etwa 1,5 Jahren Haftzugfestigkeiten von $\leq 0,1 \text{ N/mm}^2$ (Proben ohne oder mit in Fugenhöhe durchgetrennter Versiegelung). Wegen der geringen Haftzugfestigkeiten (siehe Anlagen 59 und 61) waren die während der SDM-Messungen horizontal gelagerten Proben für Querkräfte sehr empfindlich.

8.3 Prüfkörper aus Zentrival-Mörtel und Schilfsandstein

Die zusammengefaßten Ergebnisse enthält Anlage 86. Die Längenänderungen über die Fuge von 4 Proben mit trockengespritztem Zentrival-Mörtel FM 20 blieb im Klima 20/99 ab 14 bis 20 Tagen nach der Erstmessung unverändert. 81 Tage nach Erstmessung wurde über die Fugen ein mittleres Schwindmaß von 0,26 mm/m festgestellt. Am Stein wurde dagegen eine Längenzunahme von 0,24 mm/m gemessen. Die im Klima 20/65 gelagerten 3 Proben gleicher Herstellung zeigten etwa ab 47 Tagen nach der Erstmessung über die Fugen keine Längenabnahme mehr; das mittlere Schwindmaß betrug hier nach 61 Tagen 0,72 mm/m und am Stein 0,74 mm/m. An manuell mit Zentrival-Mörtel FM 10 hergestellten Schilfsandstein-Proben wurden im Klima 20/99 ab 28. Tag nach Erstmessung über die Fugen fast keine Meßwertänderung mehr festgestellt; nach 56 Tagen ergaben sich über die Fugen wie auch am Stein ein mittleres Schwindmaß von 0,07 mm/m. Im Klima 20/65 entstanden für 3 gleiche Proben mittlere Schwindwerte über die Fugen von 1,12 mm/m und am Schilfsandstein von 0,53 mm/m. Eine Veränderung der Dehnungstendenz wegen Verbundschwächung wurde an mit Zentrival-Mörtel hergestellten Schilfsandstein-Proben nicht festgestellt.

8.4 Prüfkörper aus MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel und verschiedenen Natursteinen

Diese Untersuchungen wurden an 6 Doppelsteinprüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und an 6 aus Rüthener Grünsandstein mit folgendem Mörtel durchgeführt: HGZ-Bindemittel 85/10/5; W/BM-Wert = 0,4;

$x_F = 0,05$; Methylcellulose Walocel MKX 15000 PP 11; $x_{MC} = 0,0026$. Die nach 4 Tagen ausgeschalteten Prüfkörper sind im Alter von 8 Tagen nach 7-tägiger Nachbehandlung mit Meßplättchen für SDM-Messungen beklebt und erstmals gemessen worden (siehe Anlage 87). Dann wurden je Steinart 3 Prüfkörper dem Klima 20/65 und 20/99 ausgesetzt und deren hygrische Verformung anfänglich wöchentlich gemessen. Für jede Meßstrecke wurde der Mittelwert aus den entsprechenden Einzelmessungen der 3 Prüfkörper bestimmt. Abschließend sind aus diesen Werten für gleichartige Meßstrecken Gesamtmittelwerte berechnet und diese auf den Anlagen 88 bis 91 als Kurven dargestellt worden. Diese Messungen werden fortgesetzt; nach weiteren Meßzyklen sollen abschließend die "Rest-Haftzugfestigkeiten" dieser Proben bestimmt werden.

Bei den Schilfsandstein-Probekörpern dauerte der Schwindprozeß im Klima 20/65 etwa bis zum 35. Tag (siehe Anlage 88). Der dabei entstandene Schwindwert betrug für Mörtel horizontal etwa 1,7 mm/m und für Ober- bzw. Untersteine im mörtelnahen Bereich parallel zur Fuge etwa 0,9 mm/m. Etwa um diesen Wert sind diese Steine beim kapillaren Befeuchten gequollen. Senkrecht zur Fuge und davon 5 cm entfernt wurde an beiden Steinen anfänglich ebenfalls ein Schwinden festgestellt, das später rückläufig war. Die Verformung über die Fuge (parallel zur Steinschichtung) an insgesamt 30 Einzelmeßstellen in den 4 Mantelflächen der 3 Probekörper festgestellt, setzt sich anteilig aus Mörtel- und Steinswinden zusammen und erreichte nach etwa 35 Tagen 2,5 mm/m.

Im Klima 20/99 ergaben sich für alle Meßstrecken, bis auf die senkrecht zur Fuge, zeitabhängig steigende Quellwerte (siehe Anlage 89). Die Quellung des Mörtels war niedriger als die der Schilfsandsteine, obwohl er im Klima 20/65 höhere Schwindwerte aufwies als die Steine. Besonders an einigen Meßstrecken in den Probenvorderflächen wurde für Steine und Fugen in vertikaler Richtung teilweise Schwinden festgestellt. Dieses anfängliche Schwinden über die Mörtelfugen könnte vermutlich auch wegen uneinheitlicher Dickenreduzierung der Mörtelplatten infolge Absaugens des Mörtelwassers entstanden sein. Später klang dieses Schwinden ab; über die Mörtelfugen entstand durch Auffeuchtung und damit Quellung der Steine eine positive Längenänderung (siehe Anlage 89).

Die Meßstrecken der Grünsandstein-Prüfkörper zeigten bis auf die vertikalen Meßstrecken der Ober- bzw. Untersteine klimakonformes Schwinden bzw. Quellen (siehe Anlagen 90 und 91). Im Klima 20/65 dauerte die Verkürzung der Meßstrecken senkrecht zur Fuge etwas länger als bei Schilfsandstein-Prüfkörpern; der maximale Schwindwert betrug etwa 2,7 mm/m. Parallel zur Steinflanke lag der Schwindwert für Mörtel bei 1,2 mm/m und für Steine bei etwa 0,2 mm/m. Offenbar wegen der höheren β_{HZ} zwischen Mörtel und Stein wird das Mörtelschwinden parallel zur Grenzfläche stärker behindert, so daß sich die Mörtelschwindwerte parallel und senkrecht zur Grenzfläche klarer unterscheiden dürften. An den vertikalen Meßstrecken im Stein (parallel zur Schichtung) wurde eine Längenzunahme festgestellt, offenbar bedingt durch Steinquellung infolge Wasserwanderung nach der Erstmessung und auch durch nicht hygrisch verursachte Verformungen: durch Mörtelschwinden entstanden im anhaftenden Stein horizontal zusätzliche Schwindspannungen, die ihn verkürzten, wodurch er sich senkrecht dazu etwas verlängerte (siehe Anlage 90).

Im Klima 20/99 wurden außer an den sich etwas verkürzenden vertikalen Meßstrecken am Stein (parallel zur Schichtung) für alle übrigen Meßstrecken Längenzunahmen festgestellt, die etwa nur halb so groß waren wie entsprechende Änderungen der Schilfsandstein-Probekörper (siehe Anlage 91). Für die geringe Verkürzung vertikaler Steinmeßstrecken dürften o. g. nicht hygrische Ursachen maßgebend sein.

Der verschiedene Einfluß beider Natursteinarten auf gleichem Mörtel zeigte sich in unterschiedlichen Quell- bzw. Schwindwerten des Mörtels in horizontaler Richtung. Wegen der größeren Längenänderung über die Fuge muß der Mörtel in vertikaler Richtung stärker verformbar sein als senkrecht dazu. Aus Messungen an Mörtelprismen kann offenbar ebensowenig auf im Verbund entstehende Mörteldruckfestigkeit wie hygrische Längenänderungen geschlossen werden. Während an Prismen aus MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel Schwind- und Quellmaße von etwa 4 mm/m (siehe Punkt 3.2.2) festgestellt wurden, sind die Schwind- und Quellwerte über die Fuge von Doppelstein-Prüfkörpern einschließlich dem Natursteinanteil mit etwa 2,7 mm/m bzw. 0,5 mm/m im Klima 20/65 bzw. 20/99 kleiner.

9. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungs-Teilgebietes "HGZ-Faserstopfmörtel" innerhalb des vom BMFT geförderten Forschungskomplexes "Standortsicherheits-Sanierung von Denkmalbauten" wurden umfangreiche Untersuchungen zur Verbundfestigkeit zwischen Natursteinen und hauptsächlich HGZ-Faserstopfmörtel durchgeführt. Vorzugsweise wurde Sander Schilfsandstein als Modell-Naturstein verwendet. Nach Vorliegen erster Haftzugergebnisse wurde die Natursteinpalette vergrößert und ergänzende Untersuchungen von hygrischen Natursteineigenschaften sowie Mörtелеigenschaften durchgeführt. Die zur Ermittlung der Haftzugfestigkeit als ausgewähltes Verbundkriterium geprüften Zweistein-Prüfkörper wurden auch hinsichtlich der Wasserwanderung zwischen Mörtel und Naturstein ausgewertet; an den nach der β_{HZ} -Prüfung rückgewonnenen Mörtelplatten wurden nach der Plattendruckmethode vergleichende Festmörtелеigenschaften bestimmt. Die Feuchtigkeitsbilanz wurde später durch Wasserübergangsuntersuchungen zwischen verschiedenen Natursteinen und HGZ-Faserstopfmörtel abgerundet.

An den Schilfsandstein-Prüfkörpern ergaben sich mit HGZ-Faserstopfmörtel niedrige Haftzugfestigkeiten. Auf einer der 2 Mörtelplattenoberflächen wurden häufig konkave Einbrüche bis etwa 70 % der Haftfläche und $\leq 0,5$ mm Tiefe festgestellt, weil Sander Schilfsandstein den höchsten Anteil Mörtelanmachwasser aller untersuchten Natursteine aus dem Mörtel absaugte. Mit Elmkalkstein bzw. Rühener Grünsandstein ergaben sich bei gleichartigem Mörtel gute Haftzugfestigkeiten; verbundtechnische Probleme entstanden mit ihnen nicht.

Entscheidend für die Verbundprobleme zwischen HGZ-Faserstopfmörtel und Sander Schilfsandstein sind nicht seine kapillare Wasseraufnahme bzw. sein Wasseraufnahmekoeffizient, sondern in erster Näherung seine geringere Gesamtporosität sowie geringeres Gesamtporenvolumen und besonders sein geringerer Makroporenanteil und dafür sein hoher Porenvolumenanteil für Porenradien $< 1 \mu\text{m}$. Dadurch entstand eine intensive, länger dauernde Entwässerung des Mörtels mit Bildung konkaver Einbrüche auf einer seiner Oberflächen. Weiterhin verbundstörend wirkte seine starke Quellneigung

und offenbar eine später einsetzende Intensivierung der Kapillarität durch Selbstverengung der Poren. Förderlich dafür war die langsame Erhärtung des Mörtels, sein offenbar für diese hohe Kapillarität ungenügendes Wasserrückhaltevermögen (WRV) sowie seine Leimstruktur. Zwischen kunststoffmodifiziertem Zentrival-Mörtel auf Zementbasis und Schilfsandstein entstanden dagegen hohe Haftzugwerte.

Stark quellende Natursteine sollten für einen guten Verbund nur wenig vorbefeuchtet werden, womit jedoch hohe Forderungen an das WRV des HGZ-Faserstopfmörtels gestellt werden, außerdem sollten diese Mörtel beschleunigt werden. Bei künftigem Einsatz des in Entwicklung befindlichen "schrumpf- und schwindkompensierten" HGZ-Favoritenmörtels dürften somit einige verbundstörende HGZ-Mörteleigenschaften an Einfluß verlieren.

Natursteine mit großer Porosität, geringer Quellneigung, großem Porenvolumen, großer spezifischer Oberfläche und dabei hohem Makroporenanteil entwickeln mit HGZ-Faserstopfmörtel gute Haftzugfestigkeiten. Wie bei Mauersteinen Ziegel verbundfreudig und Kalksandsteine besonders mit verzögertem Werkfrischmörtel verbundkritisch sein können, bestehen auch bei Natursteinen hinsichtlich der Verbundeignung größere Unterschiede. Daher ist es einerseits notwendig, Wissen für praktikable Lösungswege zur Verbesserung der Verbundfestigkeit zu erarbeiten, mit denen der Mörtel erforderlichenfalls dem Naturstein angepaßt werden kann, andererseits sind mit "neuen" Natursteinarten ausreichende Voruntersuchungen im Rahmen der Pilotobjekte durchzuführen. Methodisch bestehen diese Voruntersuchungen einerseits in der Herstellung von β_{HZ} -Doppelstein-Prüfkörpern, die bis zu verschiedenen Prüfterminen unter Zwang im Klima 20/65 und 20/99 gelagert werden und andererseits in der Herstellung von Dreistein-Prüfkörpern und Prüfung eintretender Längenänderungen im zyklischen Klima und bei Freibewitterung. Zunehmende Erfahrungen werden schrittweise zu Aufwandseinschränkungen führen.

10. Literaturzusammenstellung

- /1/ Oppermann, B.; Rudert, V.: Untersuchungen zur Verbesserung des Haftverbundes Mörtel/Stein
Zement-Kalk-Gips (36) 1983, H 1, S. 43 - 50

- /2/ Cordes, R.; Kasten, D. u. a.: Eignung von verzögertem Werk-Frischmörtel für Mauerwerk, Forschungsbericht April 1983
Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., Hannover

- /3/ Schubert, P.: Zur Haftscherfestigkeit zwischen Mörtel und Mauerstein, Mauerwerk-Kalender 1982, S. 497 bis 506

- /4/ Kirtschig, K.; Meyer, J.: Zum Einfluß von Zusatzmitteln auf das Verformungsverhalten von Mauermörtel
Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung, Uni Hannover
Forschungsbericht, Februar 1987

- /5/ Metzemacher, H.; Glitza, H. und Ritter, H.-J.: Einfluß der Haftscherfestigkeit von Mörteln auf die Gebrauchseigenschaften von Mauerwerk
Bautechnik 67 (1990) H 7, S. 224 ... 232

- /6/ ... DIN 1053 Teil 1: Mauerwerk, Rezeptmauerwerk, Berechnung und Ausführung; Ausgabe Februar 1990, S. 14

- /7/ ... DIN 1053 Teil 2: Mauerwerk; Mauerwerk nach Eignungsprüfung; Berechnung und Ausführung;
Ausgabe Juli 1984

- /8/ ... DIN 18555 Teil 5: Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Festmörtel; Bestimmung der Haftscherfestigkeit von Mauermörteln; Ausgabe März 1986

- /9/ Schubert, P.: Zur Festigkeit des Mörtels im Mauerwerk;
Prüfung, Beurteilung
Mauerwerk-Kalender 1988, S. 459 bis 471

- /10/ Wöhl, U.; Riechers, H.-J.: Die Druckfestigkeit von Mauermörtel in der Lagerfuge, Einflüsse und Prüfverfahren
Sonderdruck aus der Zeitschrift Bautenschutz und Bausanierung

- /10 a/ Vorläufige Richtlinie zur Ergänzung der Eignungsprüfung von Mauermörtel, Deutsche Gesellschaft für Mauerwerksbau,
Nachdruck Oktober 1992

- /11/ Weiß, D.: Prüftechnik Fugenstopfmörtel - Festmörteluntersuchung (detaillierte Beschreibung)
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, 1991,
unveröffentlicht

- /12/ Weiß, D.; Neigenfind, W.: Prüfergebnisse zur Haftzugfestigkeit von Mörteln auf Elmkalkstein
Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI), Braunschweig
Datei WE 030.txt (Krü) 12.4.89, unveröffentlicht

- /13/ Edelmann, A.: Untersuchungen zur Vertrocknungsgefahr von Werk-Frischmörteln bei Kalksandsteinmauerwerk
Die Bautechnik, 2 (1983), S. 45 - 51

- /14/ Schuh, H.: Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen
Münchener Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B (6),
München, Verlag F. Pfeil, 1987

- /15/ Uhlein, E.: Römpps Chemie-Lexikon, Bd. 5, 7. Auflage,
S. 2966
Frankh'sche Verlagshandlung Stuttgart, 1972

- /16/ ... Modern und rationell bauen mit Tylose und Hilfsmitteln
Prospekt Hoechst High Chem, Hoechst AG Frankfurt/Main

- /17/ Knöfel, D., Schubert P.: Zur Beurteilung von Mörteln für die Instandsetzung von Mauerwerk, Teil I und Teil II
Bautenschutz + Bausanierung 13 (1990) 1, S. 10 - 14
13 (1990) 2, S. 15 - 20

- /18/ ... Bestimmung der Druckfestigkeit von Mauermörtel in der Lagerfuge nach dem Plattendruckverfahren
Merkblatt, Bundesverband der Deutschen Mörtelindustrie e.V., Fassung Oktober 1989
- /19/ Schüle, W.: Feuchtigkeitstechnische Fragen beim Mauerwerksbau
Mauerwerk-Kalender 1992, S. 153 - 161
- /20/ Grimm, W.-D.: Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland
Arbeitshefte des bayrischen Landesamtes für Denkmalpflege
Arbeitsheft 50, München 1990
- /21/ Snethlage, R.: Steinkonservierung 1979 bis 1983
Arbeitshefte des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege
Arbeitsheft 22, München 1984
- /22/ Mansfeld, S. u. a.: Sedimentpetrographie und Verwitterungsphänomene des fränkischen Schilfsandsteins von Schloß Schillingfürst im Vergleich mit bruchfrischem Sander Schilfsandstein
Forschungs- und Materialprüfanstalt Baden-Württemberg, Stuttgart, 1990 (unveröffentlichtes Manuskript)
- /23/ Uhlein, E.: Römpfs Chemie-Lexikon, Bd. 1, S. 622, 7. Auflage
Frankh'sche Verlagshandlung Stuttgart, 1972
- /24/ Grassegger, G. u. a.: Die Schilfsandsteine Baden-Württembergs
Teil I: Technische Eigenschaften (Teil 1)
Bautenschutz und Bausanierung 13 (1990) 3, S. 53- 55 u. S. 68 - 70
- /25/ Schubert, P.: Zur Feuchtedehnung von Mauerwerk
Mauerwerk-Kalender 1984, S. 689 - 693

- /26/ Lutz, P.; Klopfer, H. u. a.: Lehrbuch der Bauphysik
B.G. Teubner Verlag, Stuttgart 1989
- /27/ ... DIN 52617; Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten
von Baustoffen; Ausgabe Mai 1987
- /28/ Schwarz, B.: Die kapillare Wasseraufnahme von Baustoffen
Gesundheits-Ingenieur, 93 (1972) 7, S. 206 - 211
- /29/ Hoffmann, u. a.: Laborergebnisse zu Porosität und Wasserauf-
nahme von Natursteinen; WIP im HEP, gefördert durch
KAI e.V., Abt. Bauchemie u. Korrosionsschutz;
Berlin, 18.03.1992
- /30/ Weiß, D.: Fortsetzung orientierender Untersuchungen über
Verarbeitung und Festigkeiten einschließlich Haftscherfestig-
keiten altpapierfaserhaltiger HGZ-Mörtel als Restaurierungs-
mörtel
5. Bericht Fasermörtel; Interner Untersuchungsbericht,
unveröffentlicht, Januar 1989
Fraunhofer Institut für Holzforschung (WKI), Braunschweig
- /31/ Metje, W.-R.: Zum Einfluß des Feuchtigkeitszustandes der
Steine bei der Verarbeitung auf das Trag- und Verformungsver-
halten von Mauerwerk
Mauerwerks-Kalender 1984, S. 679 - 687
- /32/ Schuhmann, H.: Hygrische und thermische Phänomene bei Natur-
steinen
Bautenschutz und Bausanierung 6 (1983) 2, S. 54 - 57
- /33/ ... Information Preßbau GmbH, Oberhausen, durch Frau Probst
am 23.10.91

Faserstopfmörtel für die Fugensanierung von Denkmalbauten

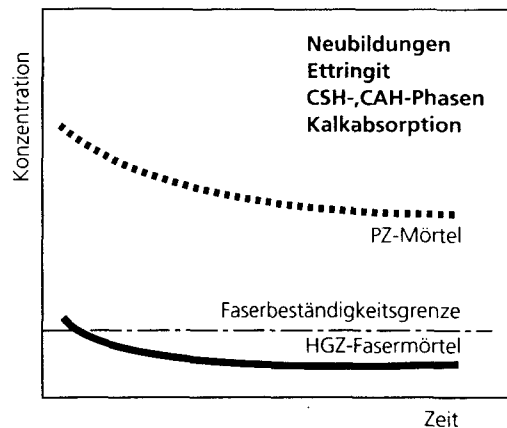
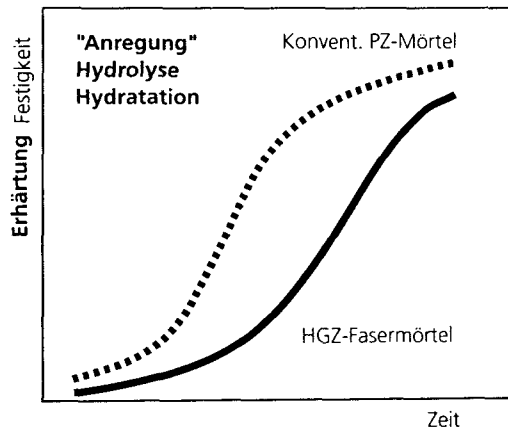
Bindemittel (HGZ)

Hüttensand ($\leq 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$)	78 - 85%
Stuckgips und/oder Anhydrit	10 - 15%
Portlandzement (PZ 45 F)	5 - 7%

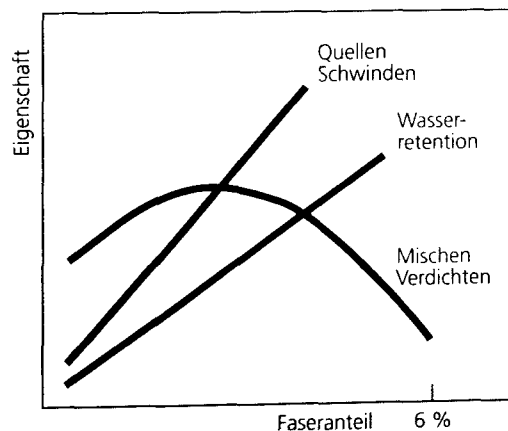
Mörtelzusammensetzung

Bindemittel	49 - 94%
Lignocellulose (Altpapierfasern)	2 - 6%
Mörtelsand (0 - 2 mm) möglich	0 - 49%
Wasser (entsprechend Stopfmörtelkonsistenz)	

Erhärtungsvorgänge

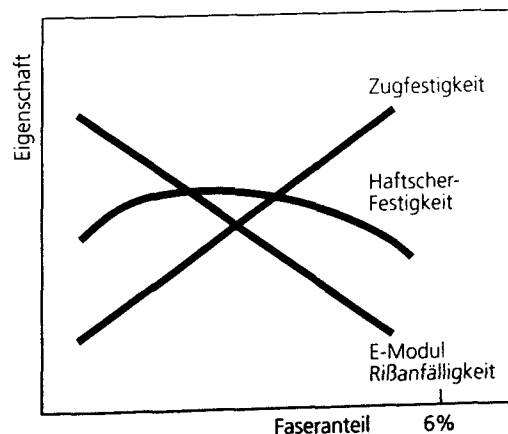


Verarbeitungseigenschaften



- Mischungsverhalten (Mörtelmischer)
- Verdichtungsverhalten (Verdichtungsgeräte)
- Faserzusätze ($\leq 4\%$) verbessern in Zusammenhang mit Mehlkornanteil die Geschmeidigkeit
- Fasern fördern Hydratation
- Modifikation mit Mörtelsand ist möglich

Besonderheiten

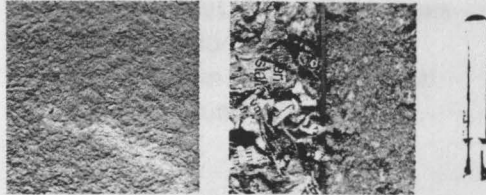


- Effektive Anwendung erfordert Mörtelmischer und Verdichtungswerkzeuge
- Faseranteil und Mörteldichte bestimmen die Festmörteleigenschaften
- Kalk- und Sulfatbeständigkeit
- Rißunanfälligkeit, Rißüberbrückung
- "Ausheileffekt"

Mischer zur Herstellung von Faserstopfmörtel

FhG
WKI

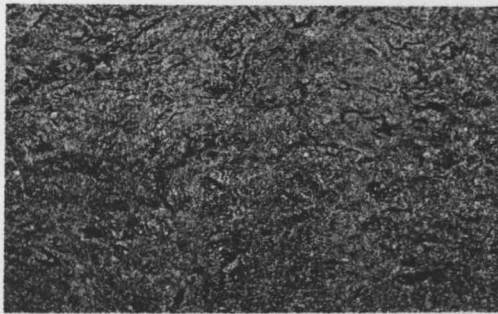
Die Komponenten



HGZ
Papierschnitzel oder Papierfasern
Anmachwasser

Ausgangssituation

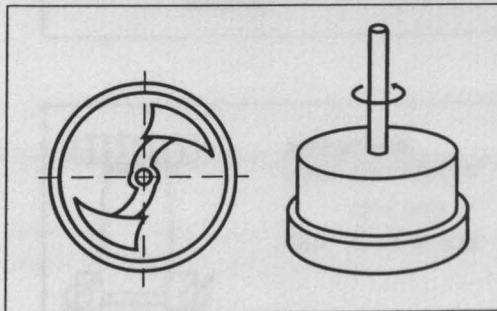
Stopfmörtel mit
deutlicher
Agglomeratbildung



Durch konventionelle Mischverfahren

- läßt sich keine agglomeratfreie Frischmasse erzeugen
- läßt sich keine homogene Wasserverteilung erreichen
- bleibt die Variation des Wasser-Bindemittel Verhältnisses beschränkt
- lassen sich keine Schnitzel einsetzen
- lassen sich akzeptable Ergebnisse nur mit hohem apparativem Aufwand erzielen

Die Idee



- Zwangsmischung hoher Intensität
- Beseitigung bzw. Verhinderung der Agglomeratbildung durch mahlartige Mischverhältnisse
- Minimierung der Komponentenvorbereitung, z.B. Verwendung von Schnitzeln statt Fasern

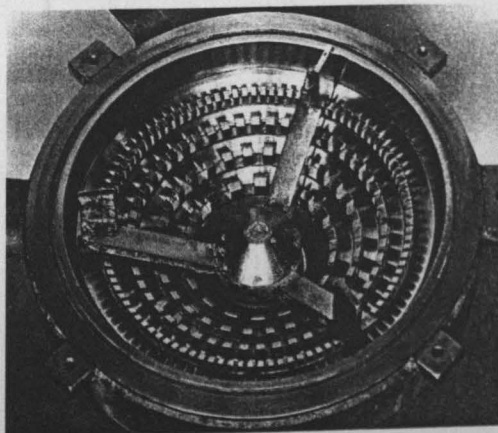
Das Ergebnis

Stopfmörtel mit
homogener Verteilung
der Fasern



Technikumschischer "Prototyp"*

- Homogene agglomeratfreie Faser-
verteilung
- keine Beschränkung des Wasser-
Bindemittel-Verhältnisses durch den
Mischvorgang
- problemlose Zerfaserung der Papierschnitzel
- durch hohe Mischintensität kein
Vormischen der Bindemittelkomponenten
erforderlich
- gute Reproduzierbarkeit des Misch-
ergebnisses



Mischrotor mit
Zahnscheiben

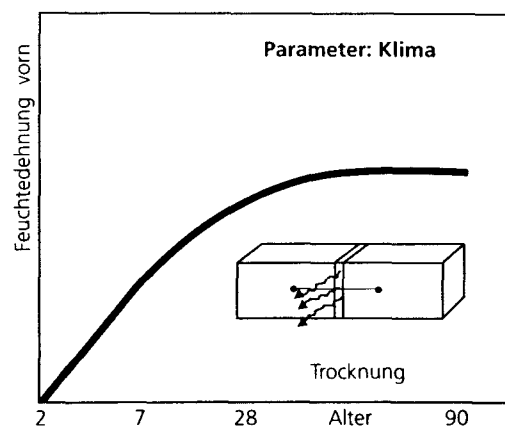
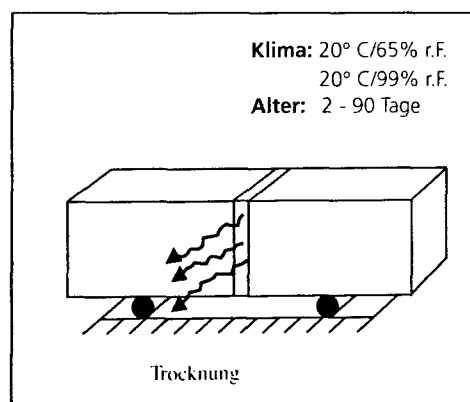
*Hersteller: Cavitron, 4322 Sprockhövel

Ziel

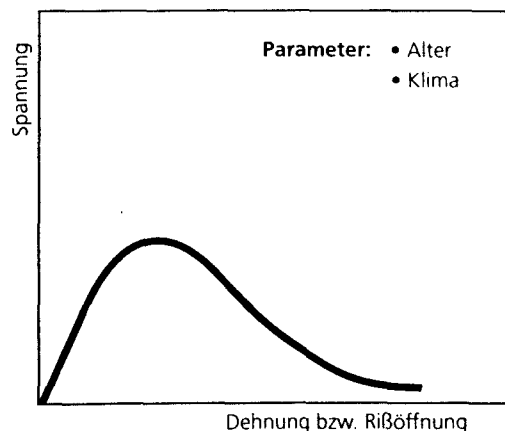
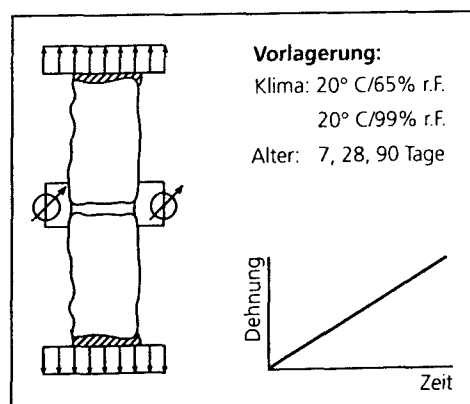
Untersuchung des Verbundverhaltens
verschiedener Mörtel-Stein
Kombinationen in Abhängigkeit von
Klimabelastung und Mörtelalter

Vorgehen

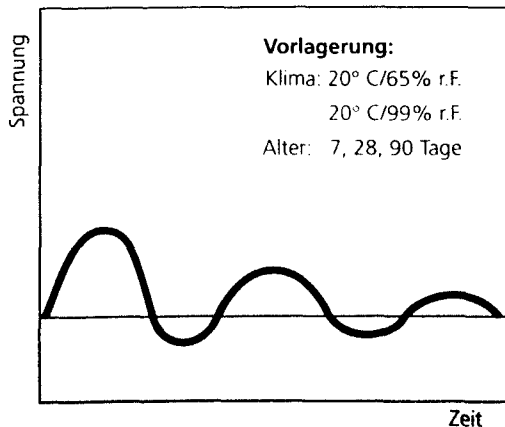
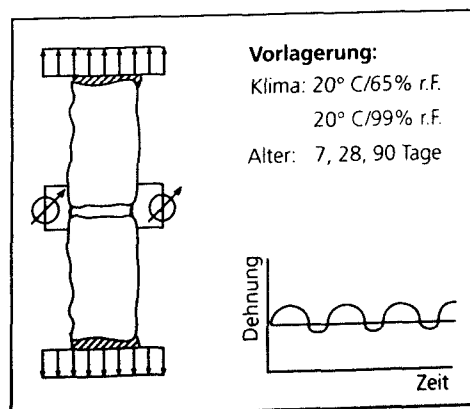
Unbehinderte
thermisch-hygrische
Dehnung
teilweise versiegelter
Verbundkörper



Steifigkeit und
Haftzugfestigkeit,
Rißprozeß



Zwängung
infolge Simulation
thermisch-hygrischer
Dehnungszyklen



Verbundtechnische Eigenschaften von Mörtel und Naturstein

Die Verbundqualität ist abhängig von den verbundtechnischen Eigenschaften des Mörtels und Natursteines:

Werkstoff	Verbundtechnische Eigenschaften
Mörtel	chemische Beständigkeit gegen Altmörtel und Atmosphärien, zeitliche Unveränderlichkeit und Verrottungssicherheit, geringe thermisch-hygrische Längenänderungen, rasche Erhärtungsgeschwindigkeit und geringe Schrumpftneigung, gute Verdichtbarkeit, Plastizität und Zusammenhaltevermögen, gute Einbringbarkeit in Fugen verschiedener Dicke, hohes Wasserrückhaltevermögen gegenüber kapillaraktiven Natursteinen, Fähigkeit guter Benetzung und Eindringen in Grobporen, hoher Bindemittelanteil und Feinheit der Bindemittelkomponenten, geringer Luftporenanteil und vollflächiger Kontakt, Kompensierung der kapillaren Saugfähigkeit der Natursteine, geringer E-Modul, ausreichende Festigkeit, hohe Dichte und Frostbeständigkeit des Festmörtels, hohe Adhäsion am Naturstein und Mikroverdübelung, Kompensation des Schrumpfens und anfänglichen Schwindens infolge Wasserabsaugens durch den Naturstein.
Naturstein	geringe kapillare Saugkräfte; breites Porenradienspektrum und hoher Anteil Grobporen, chemische, erosive und thermisch-hygrische Beständigkeit, hohe innere Festigkeit und feste Kornkontakte, Rohdichte deutlich kleiner als Reindichte, hohe Porosität und innere spezifische Oberfläche, geringe Quell- bzw. Schwindwerte, Frostbeständigkeit, Salzfreiheit, frei von löslichen verbundschädigenden bzw. erhärtungsstörenden Bestandteilen.

Feuchtigkeitsbilanz der Doppelstein-Prüfkörper (Datenerfassung und -berechnung, Rechengang)

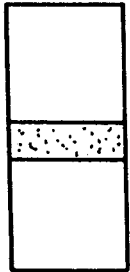
1. Herstellung der Prüfkörper

gemessen:

berechnet:

Masse Steine nach
Befeuchten M_{SH}

Feuchtigkeit Steine
 $u_{SH} = \frac{M_{SH} - M_{Str}}{M_{Str}}$



- Masse Prüfkörper M_{PKH}
= $M_{PK4d} + 1 \text{ g}$

- Masse Mörtel $M_{MöH} = M_{PKH} - M_{SH}$
oder:
- $M_{MöH}^* = M_{Mötr} \frac{1 + x + w}{1 + x + w_0}$

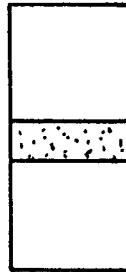
(w_0 geschätzt)
Kontrolle: $M_{MöH} = 1/6$ des Mörtelverbrauchs
für 6 Prüfkörper

2. Entschalung der Prüfkörper

gemessen:

berechnet:

Masse Prüf-
körper M_{PK4d}



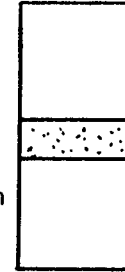
—

3. β_{HZ} -Bestimmung der Prüfkörper

gemessen:

berechnet:

- Masse Prüfkörper M_{PKP}
- Masse Mörtel $M_{MöP}$ 1)
- Steinmassen
(Verluste durch Ab-
schlagen der geklebten
Zugplatten)

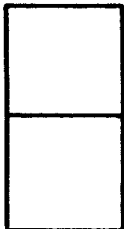


- Steinmassen $M_{SP} = M_{PKP} - M_{MöP}$
- Prüffeuchtigkeit Steine u_{SP}
- Prüffeuchtigkeit Mörtel $u_{MöP}$
- Trockenmasse Mörtel $M_{Mötr}$

- $M_{SP}^* = M_{SH} \frac{1 + u_{SP}}{1 + u_{SH}}$

1) Wenn Steinnanhang am Mörtel, dann Abnahme
nach Trocknung und Massenkorrektur

4. Massenänderung Steine bis Prüfung



$\Delta M_S = M_{SP} - M_{SH}$

oder

$\Delta M_S^* = M_{SP}^* - M_{SH}$

5. Massenänderung Mörtel bis Prüfung



$\Delta M_{Mö} = M_{MöP} - M_{MöH}$

oder $\Delta M_{Mö} = M_{MöP} - M_{MöH}^*$

oder $\Delta M_{Mö} = M_{MöP} - M_{MöH}$

Bei austrocknungssicherer Lagerung der Prüfkörper in Folienbeuteln bis Prüfung muß $\Delta M_{Mö} \leq M_w$ sein.

Die Masseaufnahme der Steine muß ebenfalls $\leq M_w$ sein, sonst evtl. Fremdwasserzutritt bis 4. Tag
durch Abdeckung mit feuchtem Tuch.

- Anlage 5 -

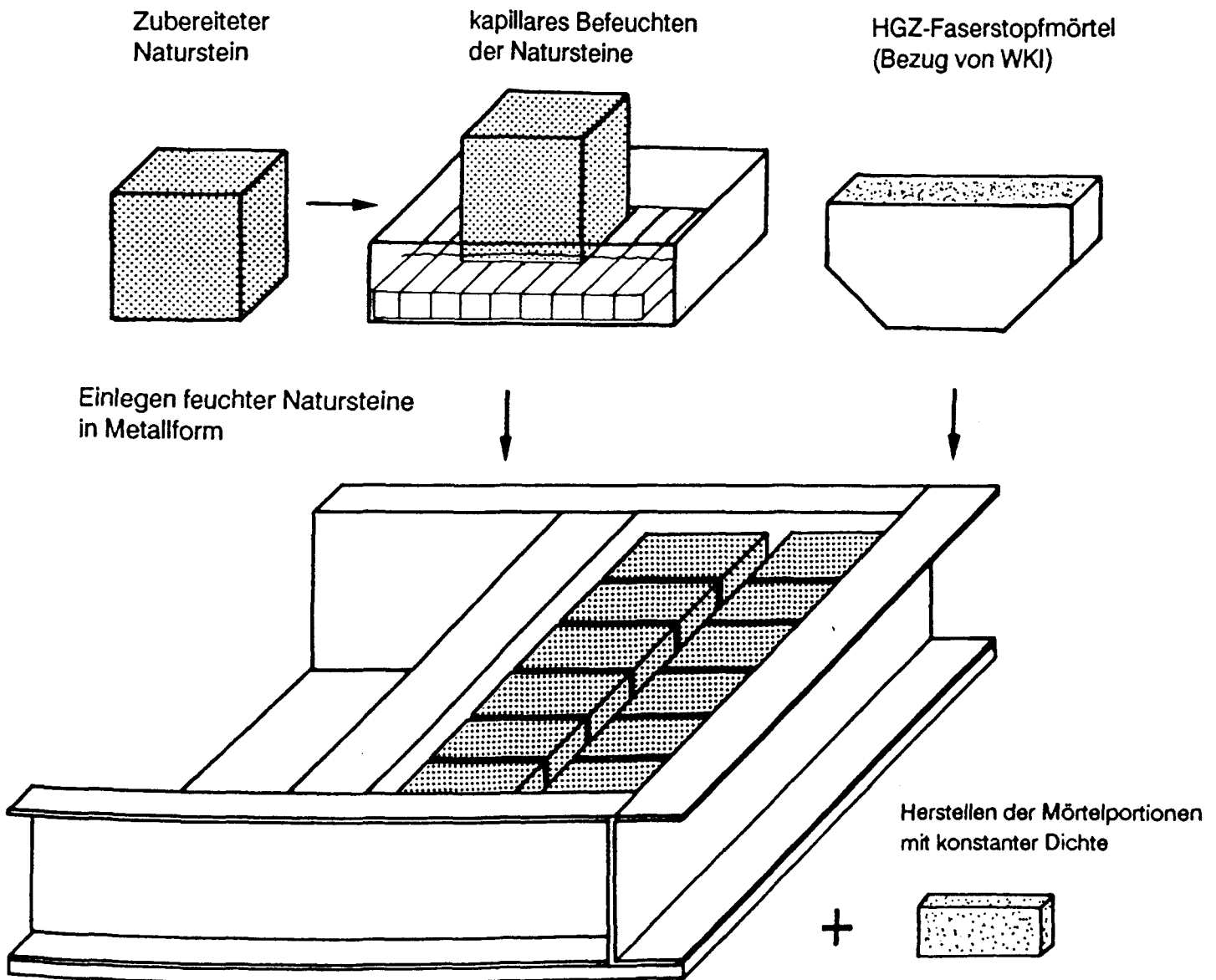
Einfluß versuchsbedingter Fehler auf die Größe der Massedifferenzen bei der Feuchtheitsbilanz

Eine deutliche Wirkung dieser Fehler auf die Massedifferenzen ist dann nicht auszuschließen, wenn die Massenänderungen der Steine ($M_{Sp} - M_{SH}$) bzw. der Mörtel ($M_{MöP} - M_{MöH}$) größer sind als der rechnerische Wasseranteil des Frischbetonmörtels gemäß Rezeptur.

(Erläuterung der Abkürzungen siehe Anlage 5)

Fehler	Einfluß auf die Stein- bzw. Mörtelmassen	Einfluß auf die Massedifferenzen (Zustand Prüfung minus Zustand Herstellung)
Fremdwasserzutritt (zu den hergestellten Prüfkörpern während der Lagerung in der Form bis zum Ausschalen nach 4 Tagen bzw. Prüftag infolge "undichter" Folienlage unter dem feuchten Nessel (siehe Punkt 2.4))	<p>→ zu hohe M_{PK4d} ergibt</p> <ul style="list-style-type: none"> • zu hohe M_{PKH} und • zu hohe $M_{MöH} (= M_{PKH} - M_{SH})$ <p>→ zu hohe M_{PKP} ergibt</p> <ul style="list-style-type: none"> • zu hohe $M_{Sp} (= M_{PKP} - M_{MöP})$ 	<p>$\Delta M_S = (M_{Sp} - M_{SH}) \rightarrow$ größer als real</p> <p>$\Delta M_{Mö} = (M_{MöP} - M_{MöH}) \rightarrow$ größer als real</p>
verspätete Massebestimmung (der von den Zugplatten befreiten Steine und der abgelösten Mörtelplatten nach der Prüfung, wodurch wegen Austrocknung geringere Massen erhalten wurden)	<p>→ zu niedrige M_{Sp}^* ergibt</p> <ul style="list-style-type: none"> • zu niedrige u_{Sp} und damit $M_{MöH}^*$ <p>→ zu niedrige $M_{MöP}$ ergibt</p> <ul style="list-style-type: none"> • zu niedrige $u_{MöP}$ • zu hohe $M_{Sp} (= M_{PKP} - M_{MöP})$ 	<p>$\Delta M_S = (M_{Sp} - M_{SH}) \rightarrow$ kleiner als real</p> <p>$\Delta M_{Mö} = (M_{MöP} - M_{MöH}) \rightarrow$ kleiner als real (Einfluß dürfte i.d.R. klein bleiben)</p>

Herstellprinzip der Doppelstein-Prüfkörper aus Natursteinen und HGZ-Faserstopfmörtel



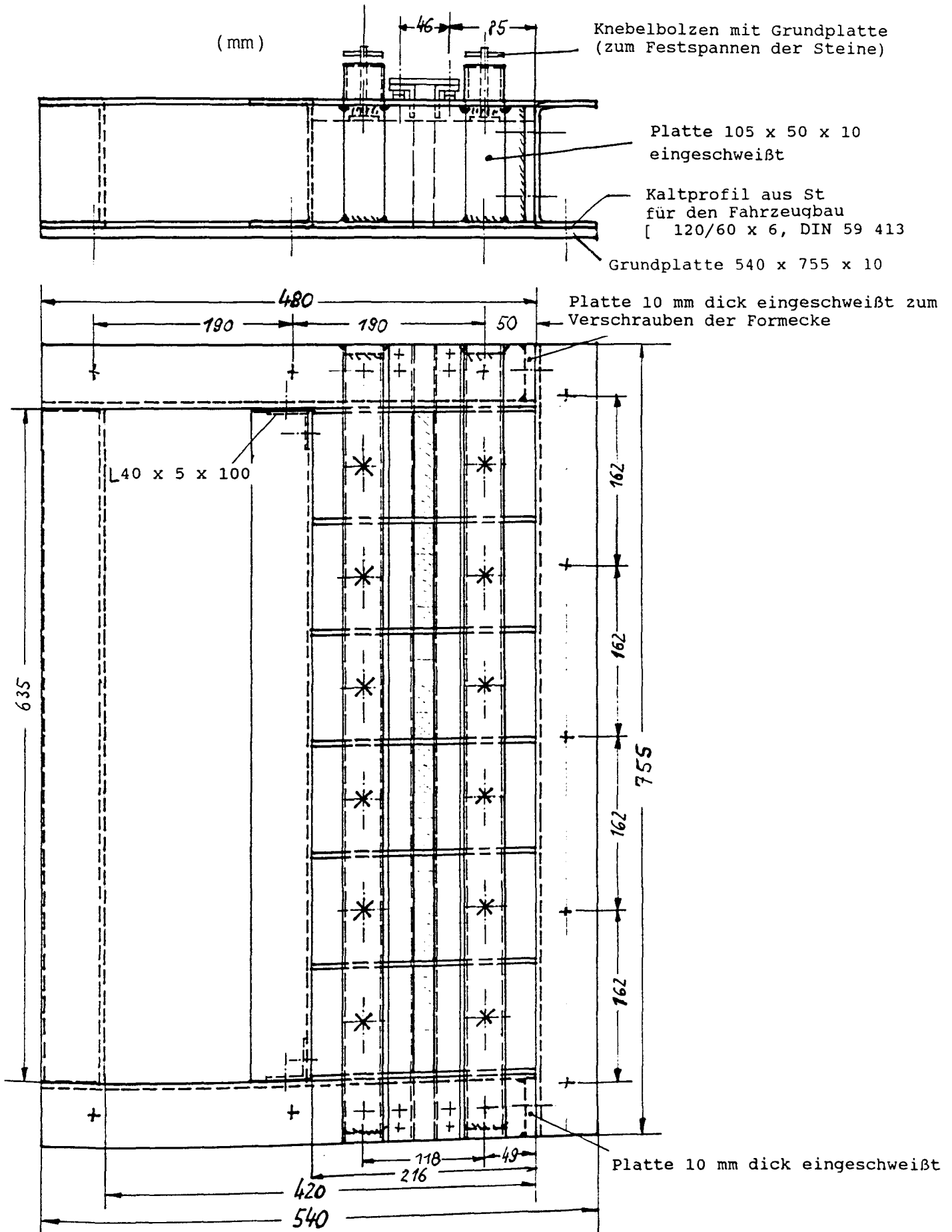
- Verstopfen der Fugen

händig oder maschinell

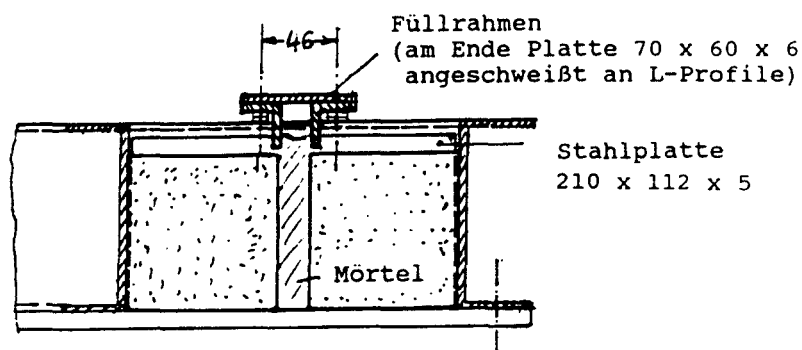
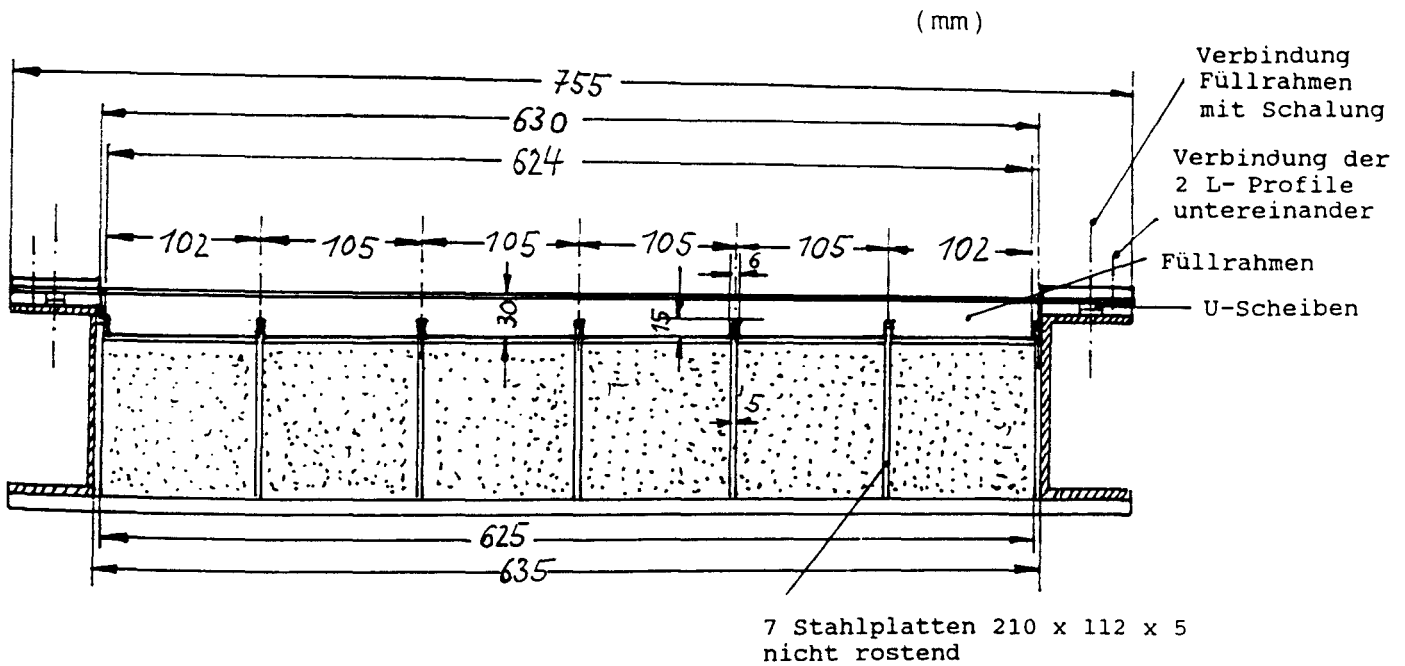
- Lagern der Doppelsteinprüfkörper bis zur Entschalreife (z.B. 4 Tage) (austrocknungssicher in Folie und unter feuchten Tüchern)
- Ausschalen, Massekontrolle
- Lagern im Klima 20/65 bzw. 20/99
- Prüfung auf Haftzugfestigkeit, nach 7 d, 28 d oder 90 d

- Anlage 8 -

Form zur Herstellung von 6 Haftzugfestigkeits-Prüfkörpern
 100 x 100 x 196 ... 420 mm³ mit verstellbarer Längsschalung



Schnitt durch die Form zur Herstellung von 6 Haftzugfestigkeits-Prüfkörpern mit eingelegten Steinen (ohne Spannvorrichtung)



Eigenschaften ungemagerter bzw. gemagerter 4 x 4 x 16 cm³ großer HGZ-Fasermörtelprismen
(Mörtelherstellung nach Handstreuverfahren)
Lagerung: Mörtelplatten 2 Tage in Form, dann Prismenzuschnitt; anschließend im Klima 20/65
offen bzw. in Aluminiumfolie eingeklebt.

Rezeptur- daten	Prüfalter	Rohdichte, Biegezug- und Druckfestigkeit								Dynamischer E-Modul			
		ρ (n = 4)		β_{BZ} (n = 4)		β_D (n = 8)		Prüffeuchte		ρ		E_{dyn}	
		kg/dm ³		N/mm ²		N/mm ²		M.-%		kg/dm ³		10 ³ ·N/mm ²	
		20/65	Folie	20/65	Folie	20/65	Folie	20/65	Folie	20/65	Folie	20/65	Folie
HGZ-BM: 0,78 Hüttensand 0,15 Anhydrit 0,07 PZ 45 F $x_F = 0,05$ $x_S = 0$ $W = 0,49$ (ungemagert)	7 d \bar{x}	1,53	1,64	3,8	3,8	11,6	11,2	18,3	27,7	1,53	1,65	8,6	9,4
		2,1 %	1,0 %	10,0 %	17,1 %	6,1 %	4,6 %	5,2 %	6,5 %	2,0 %	1,1 %	8,0 %	3,9 %
	28 d \bar{x}	1,42	1,64	4,2	5,2	14,8	14,6	11,5	25,2	1,43	1,64	8,4	10,8
		2,0 %	0,6 %	11,0 %	11,8 %	4,5 %	6,2 %	4,7 %	4,9 %	2,0 %	0,5 %	9,7 %	6,7 %
	90 d \bar{x}	1,40	1,60	5,1	5,4	18,5	17,0	9,1	27,3	1,41	1,62	8,4	10,4
HGZ-BM: 0,78 Hüttensand 0,15 Anhydrit 0,07 PZ 45 F $x_F = 0,05$ $x_S = 1,0$ (NS 1:0,5 - 1 mm) $W = 0,52$ (gemagert)		1,9 %	1,3 %	5,9 %	11,0 %	6,1 %	8,0 %	8,6 %	2,6 %	1,1 %	1,1 %	8,5 %	6,8 %
	180 d \bar{x}	1,37	1,63	5,3	5,5	16,4	19,3	5,8	27,7	1,38	1,61	8,3	12,0
		2,1 %	1,0 %	7,8 %	8,5 %	10,9 %	4,8 %	17,5 %	4,2 %	1,8 %	1,4 %	5,0 %	5,7 %
	Vergleichs- körper \bar{x} (nur WL) V									1) 1,24 3,8 %	2) 1,26 1,4 %	1) 7,6 22,7 %	2) 8,2 15,6 %
	7 d \bar{x}	1,76	1,89	3,2	3,9	11,9	10,7	9,3	15,2	1,77	1,90	13,8	16,5
HGZ-BM: 0,78 Hüttensand 0,15 Anhydrit 0,07 PZ 45 F $x_F = 0,05$ $x_S = 1,0$ (NS 1:0,5 - 1 mm) $W = 0,52$ (gemagert)		1,5 %	1,0 %	8,1 %	17,7 %	9,3 %	8,2 %	5,2 %	3,4 %	1,5 %	1,0 %	10,0 %	9,6 %
	28 d \bar{x}	1,71	1,87	3,7	4,3	14,8	12,7	-	-	1,71	1,88	14,0	17,4
		3,0 %	1,7 %	12,3 %	16,9 %	9,8 %	5,1 %			3,0 %	1,6 %	13,1 %	4,8 %
	90 d \bar{x}	1,67	1,86	4,7	4,7	15,9	16,3	4,4	15,2	1,65	1,86	15,5	14,9
		2,0 %	2,2 %	1,7 %	6,6 %	9,1 %	9,6 %	7,8 %	5,1 %	2,2 %	1,9 %	9,2 %	9,6 %
	180 d \bar{x}	1,67	1,85	4,9	5,4	14,7	17,3	3,3	16,7	1,66	1,88	13,4	18,5
		1,5 %	1,4 %	17,4 %	2,8 %	11,8 %	9,2 %	5,2 %	6,2 %	1,2 %	2,0 %	9,0 %	2,2 %
	Vergleichs- körper \bar{x} (nur WL) V									1) 1,61 2,0 %	2) 1,61 5,3 %	1) 10,4 13,3 %	2) 10,8 23,4 %

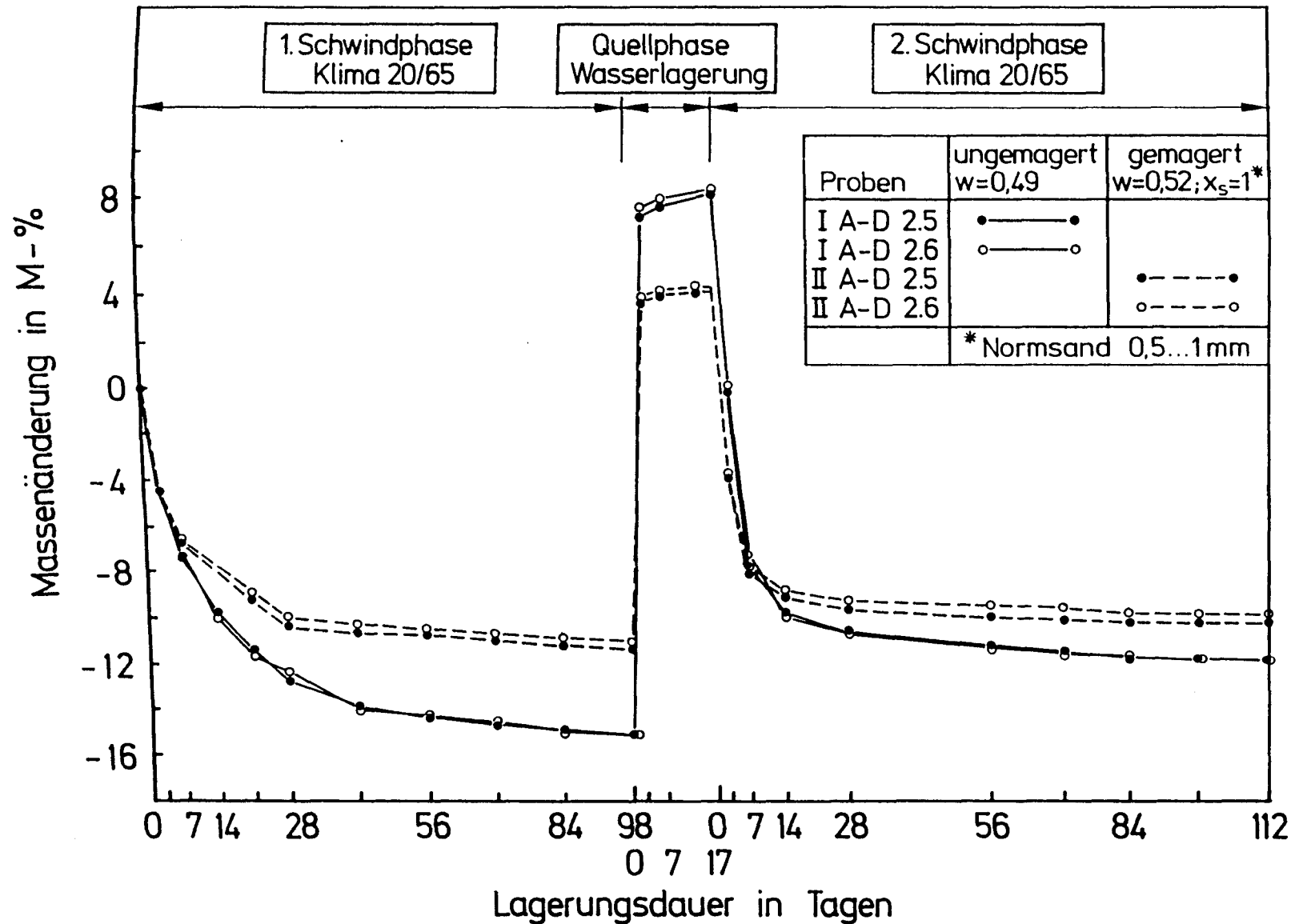
V = Variationskoeffizient 1) Mittelwerte von je 4 Prismen nach Längenänderungsmessung und Trocknung;
 ρ = Rohdichte 2) Prismenalter etwa 255 Tage x_F = Faser-Bindemittel-Verhältnis
 NS 1 = Normsand 0,5 bis 1,0 mm w = Wasser-Bindemittel-Verhältnis x_S = Sand-Bindemittel-Verhältnis

Rohdichte, Biegezug- und Druckfestigkeit ungemagerter 4 x 4 x 16 cm³ großer HGZ-Fasermörtelprismen
(Mörtelherstellung im Zwangsmischer; n = 6 für ρ , β_{BZ} ; n = 12 für β_D)

Rezeptur- kenndaten: $x_F = 0,05$ $x_S = 0$ $w^s = 0,50$		Prüfalter																							
		7 d						28 d									90 d								
		herstellungsfeucht			getrocknet			herstellungsfeucht			getrocknet			Lagerung im Klima			herstellungsfeucht			getrocknet			Lagerung im Klima		
		ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D	ρ	β_{BZ}	β_D
		kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²
1.1 K 1/1 ... 48 BM-Rez.: 85/10/5 Klima: 20/65	\bar{x} V	1755	5,0 5,0 %	15,8 7,8 %	1365	3,8 10,2 %	24,4 5,2 %	1760	5,6 8,2 %	21,0 8,6 %	1400	4,0 20,1 %	27,6 10,2 %	1585	3,1 8,6 %	21,6 4,1 %	1735	6,0 4,0 %	24,7 7,5 %	1415	4,6 16,3 %	32,5 6,0 %	1495	4,5 3,9 %	24,0 7,4 %
02 K 1/1 ... 24 BM-Rez.: 85/10/5 Klima: 20/65	\bar{x} V	1740	4,8 5,5 %	14,7 6,5 %	-	-	-	1735	5,2 10,5 %	18,8 5,0 %	1350	3,5 12,1 %	25,1 7,3 %	1540	2,9 17,3 %	19,0 8,7 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02 K 1 II/1 ... 24 BM-Rez.: 78/15/7 Klima: 20/65	\bar{x} V	1745	5,1 5,8 %	17,4 6,4 %	-	-	-	1740	5,7 7,8 %	22,5 4,2 %	1385	3,4 23,7 %	31,5 5,9 %	1575	3,0 18,1 %	24,3 2,0 %	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.1 K 2/1 ... 48 BM-Rez.: 85/10/5 Klima: 20/99	\bar{x} V	1885	4,8 6,8 %	15,6 7,4 %	1370	3,1 14,9 %	25,6 11,7 %	1755	5,7 8,8 %	18,5 10,5 %	1365	2,8 18,9 %	24,9 13,5 %	1775	6,1 4,9 %	18,3 3,8 %	1775	6,1 6,3 %	24,1 6,6 %	1390	3,1 8,0 %	28,6 5,3 %	1760	5,5 21,6 %	20,5 13,9 %
1.1 K 2 II/1 ... 48 BM-Rez.: 75/15/7 Klima: 20/99	\bar{x} V	1730	6,0 9,5 %	20,5 6,2 %	1375	4,2 16,5 %	30,2 4,8 %	1730	6,3 5,7 %	21,3 3,5 %	1375	4,3 18,6 %	29,8 5,4 %	1755	6,8 3,4 %	20,8 5,6 %	1770	6,9 6,2 %	24,7 6,3 %	1395	4,5 10,5 %	32,9 5,5 %	1740	6,8 7,3 %	25,2 5,2 %

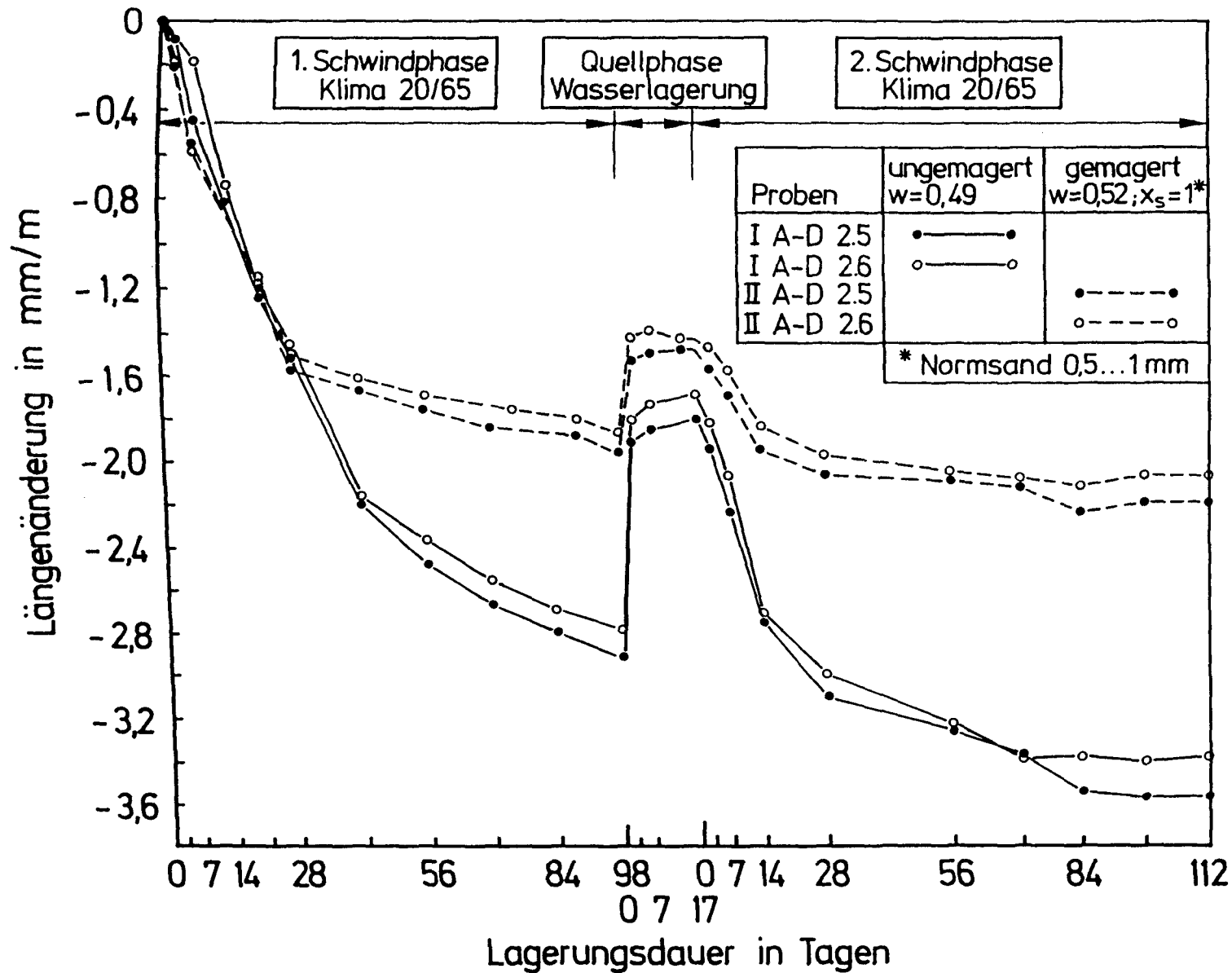
V = Variationskoeffizient

ρ = Rohdichte



Massenänderung gemagerter und ungemagerter HGZ-Fasermörtelprismen im Klima 20/65,
bei Wasserlagerung und anschließender Rückklimatisierung im Klima 20/65

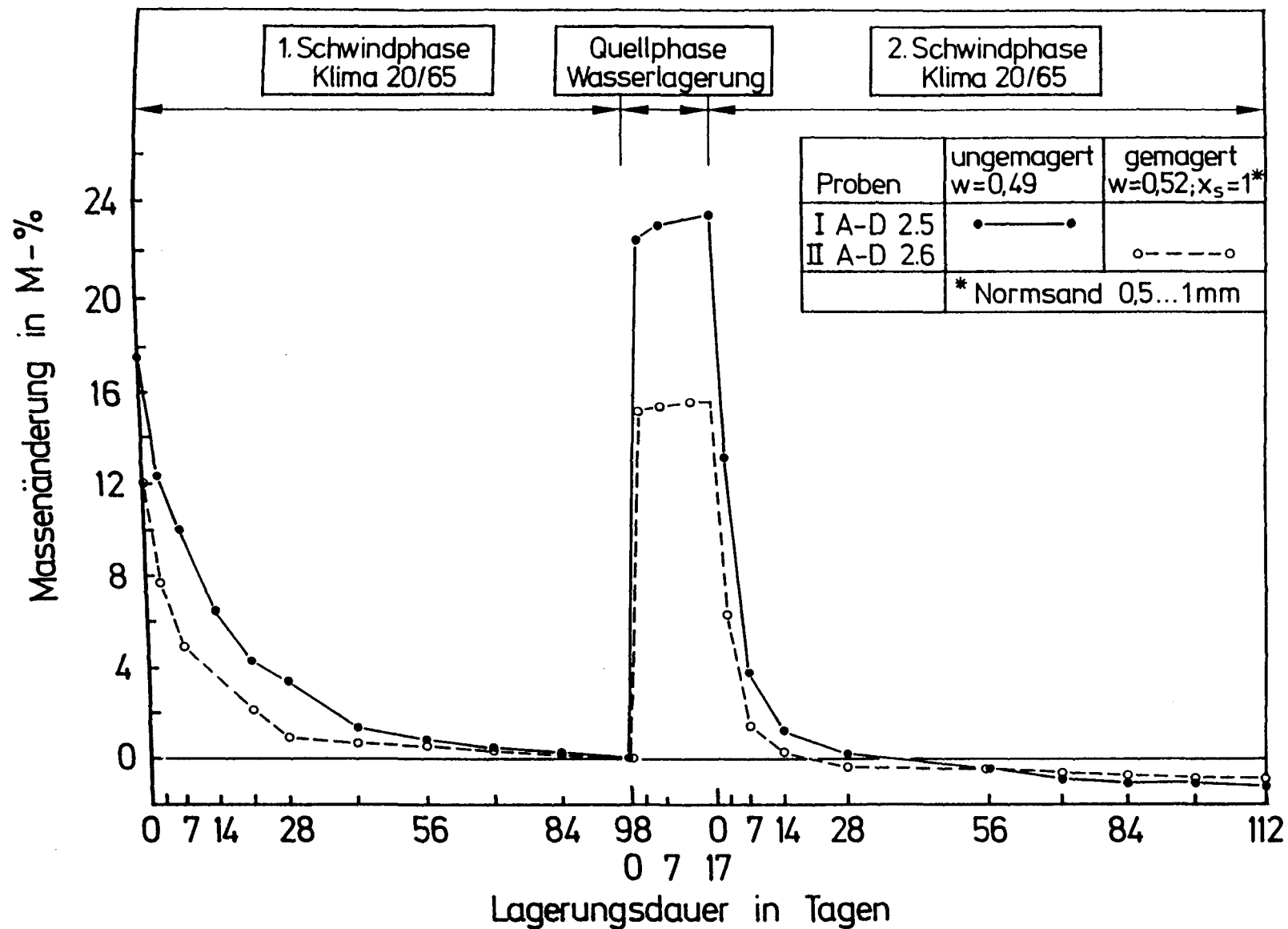
(Bezugswerte: Ausgangsmasse für 1. Schwindphase; Endmasse 1. Schwindphase für Quellphase und
Endmasse Quellphase für 2. Schwindphase)



Längenänderung gemagerter und ungemagerter HGZ-Fasermörtelprismen im Klima 20/65, bei Wasserlagerung und anschließender Rückklimatisierung im Klima 20/65

(Bezugswerte: Ausgangslänge für 1. Schwindphase; Endlänge 1. Schwindphase für Quellphase und Endlänge Quellphase für 2. Schwindphase)

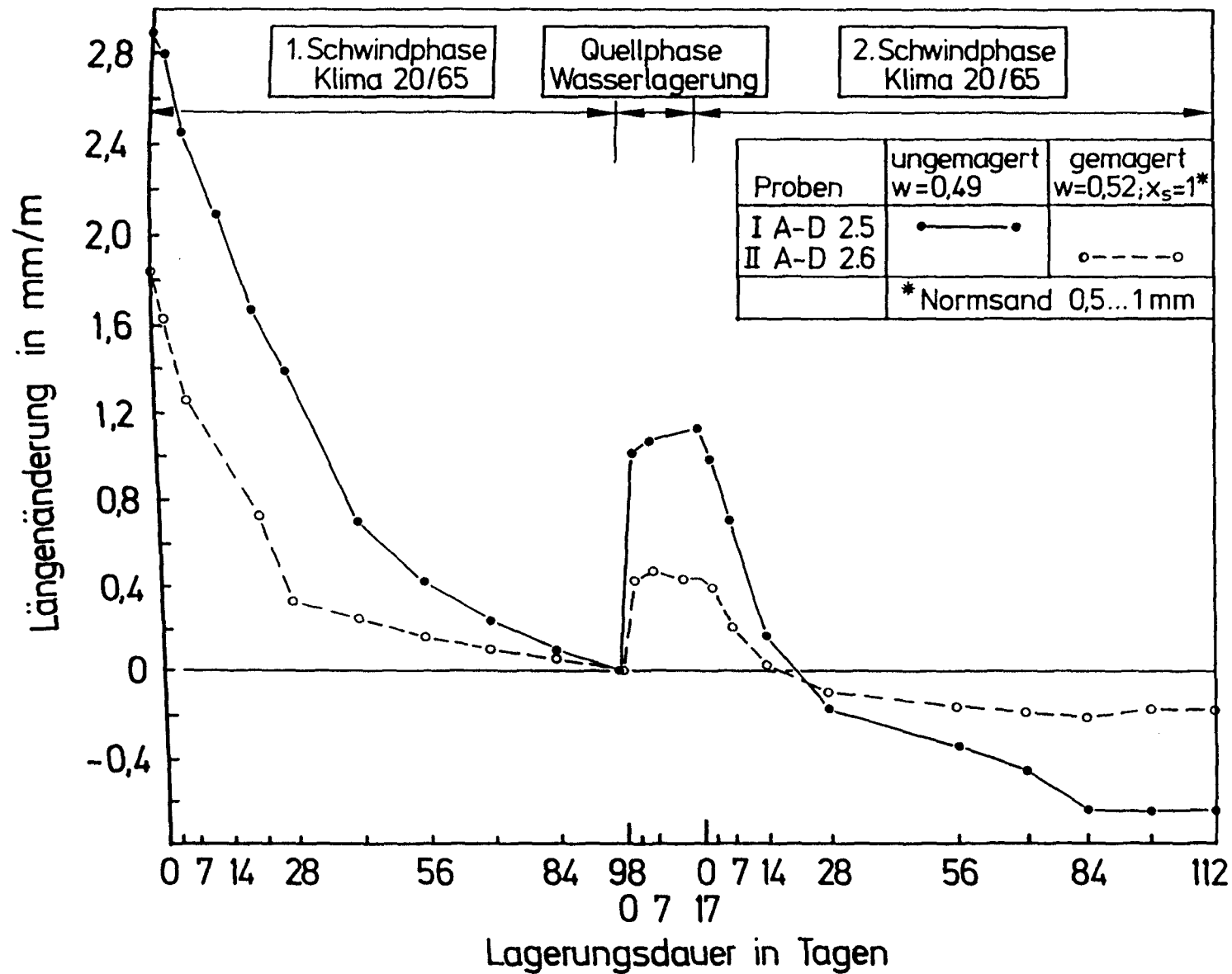
- Anlage 13 -



Massenänderung gemagerter und ungemagerter HGZ-Fasermörtelprismen im Klima 20/65,
bei Wasserlagerung und anschließender Rückklimatisierung im Klima 20/65

(Bezugswert: Endmasse 1. Schwindphase)

- Anlage 14 -



Längenänderung gemagerter und ungemagerter HGZ-Fasermörtelprismen im Klima 20/65,
bei Wasserlagerung und anschließender Rückklimatisierung im Klima 20/65

(Bezugswert: Endlänge 1. Schwindphase)

- Anlage 15 -

Zentrische Zugfestigkeit, dynamischer E-Modul und Druckfestigkeit,
ungemagerter und gemagerter HGZ-Fasermörtelprismen (4 x 4 x 16 cm³,
Mörtelherstellung im Handstreuverfahren)

Lagerung: Mörtelplatten 2 Tage in der Form, dann Prismenzuschnitt;
anschließend im Klima 20/65 offen bzw. in Aluminiumfolie
eingeklebt

Rezepturdaten	Prüf- alter	Zentrische Zugfestigkeit, weitere Eigenschaften (n = 2)									
		Rohdichte ρ		Zentrische Zugfestig- keit β_{ZZ}		Bruch- dehnung ϵ		dynamischer E-Modul E_{dyn}		Druckfestig- keit β_D	
-	d	kg/dm ³		N/mm ²		‰		10 ³ · N/mm ²		N/mm ²	
(78/15/7)		20/65	Folie	20/65	Folie	Lagerung		20/65	Folie	20/65	Folie
$x_F = 0,05$ $x_S = 0$ $w = 0,49$ (ungemagert)	28	-	-	2,4 2)	2,0 2)	0,52 2)	0,33 2)	8,16	10,49	15,8 2)	17,7 2)
	210	1,30	1,62	1,0	2,3	0,43	0,45	5,65	11,95	11,1	23,5
(78/15/7) $x_F = 0,05$; $x_S = 1,0$ NS 1: 0,5/1 mm $w = 0,52$ (gemagert)	37	-	-	2,3 2)	1,9 2)	0,27 2)	0,18 2)	14,5	17,4	14,1 2)	15,3 2)
	210	1,63	1,84	1,1	2,3	0,26	0,28	13,0	18,4	10,5	22,8

1) 55 Tage alt; 2) etwa 280 Tage alt; 3) 48 Tage alt; NS = Normsand

Wärmedehnkoeffizient ungemagerter und gemagerter 4 x 4 x 16 cm³
großer HGZ-Faserstopfmörtelprismen
(Mörtelherstellung im Handstreuverfahren)

Rezeptur- daten	Prüfalter	dynamischer E-Modul	Wärmedehnkoeffizient
-	d	N/mm ²	10 ⁻⁶ m/m · K ⁻¹ V
(78/15/7) x _f = 0,05 x _S = 0 W = 0,49 (ungemagert)	41 (n = 4) 264 (n = 8)	- 7900	9,13 1) 6,9 % 9,56 2) 10,3 %
(78/15/7) x _S = 0,05, x _S = 1 NS 1: 0,5/1 mm W = 0,52 (gemagert)	41 (n = 4) 257 (n = 8)	- 10600	9,75 1) 6,6 % 9,38 2) 9,8 %

V = Variationskoeffizient; NS = Normsand

- 1) Diese Mörtelprismen von 4 x 4 x 16 cm³ lagerten bis zum 28. Tag im Klima 20/65, danach wurden sie bei 60°C getrocknet (n = 4)
- 2) Diese Mörtelprismen von 4 x 4 x 16 cm³ wurden zur Bestimmung der hygrischen Längenänderung (siehe Punkt 3.2) verwendet. Daran anschließend wurde der dynamische E-Modul und dann der Wärmedehnkoeffizient ermittelt (n = 8).

Prüfung auf Frostwiderstandsfähigkeit ungemagerter bzw. gemagerter HGZ-Fasermörtelprismen nach 15 Frost-Tau-Wechseln (jeweils $n = 4$)

Rezepturdaten			Rohdichte ρ	Biegezug- festigkeit β_{BZ}	Druckfe- stigkeit β_D	Prüffeuch- tigkeit u
-			kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²	M.-%
ungemagert HGZ-BM: 78/15/7 $x_F = 0,05$ $W = 0,49$ $x_S = 0$	FTW- Prüfkörper	\bar{x}	-	-	12,7	30,1
		V			3,5 %	9,2 %
	Vergleichs- Prüfkörper	\bar{x}	1,68	2,6	11,3	28,0
		V	1,3 %	19,1 %	11,3 %	4,1 %
	FTW- Prüfkörper	\bar{x}	-	-	9,9	18,5
		V			11,8 %	9,4 %
gemagert HGZ-BM: 78/15/7 $x_F = 0,05$ $W = 0,52$ $x_S = 1$ (Normsand 0,5 ... 1 mm)	Vergleichs- Prüfkörper	\bar{x}	1,92	2,6	9,9	18,3
		V	1,1 %	9,1 %	11,4 %	6,4 %

V = Variationskoeffizient

Bei Prüfung der Frostwiderstandsfähigkeit mittels 15 Frost-Tau-Zyklen waren die Prüfkörper 82 Tage alt; bis dahin lagerten sie im Klima 20/65.

Vor Befrostungsbeginn wurden die in 2 Hälften geteilten Prismen was-sergelagert und dann in Dosen dichtverschlossen, um Auslaugungen zu vermeiden. An ihnen konnten keine Biegezugfestigkeiten bestimmt wer-den. Die Vergleichsprüfkörper verblieben bis zur Festigkeitsprüfung der FTW-behandelten Proben im Wasser.

Festigkeitseigenschaften Methylcellulose-modifizierter
HGZ-Faserstopfmörtel-Prismen

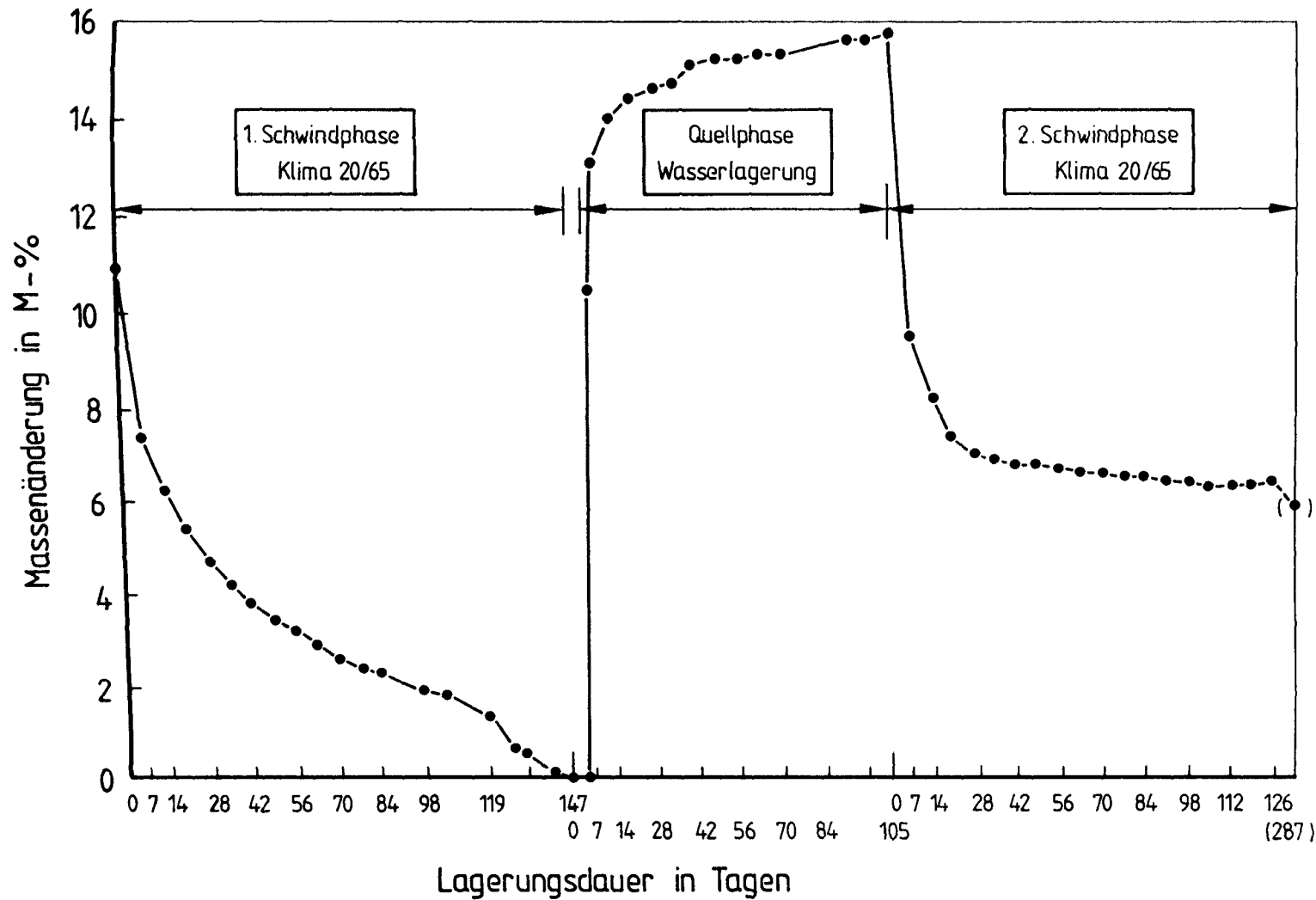
Lagerungs- art	Prüfalter	Prüfdichte (n = 4)	dynamischer E-Modul (n = 4) \bar{x} V	Biegezug- festigkeit (n = 4) \bar{x} V	Druckfe- stigkeit (n = 8) \bar{x} V	Trockenroh- dichte
	d	kg/dm ³	N/mm ² %	N/mm ² %	N/mm ² %	kg/dm ³
herstel- lungs- feucht, in Folie einge- schweißt	7 28 90 180	1,78 1,80 1,73 1,71	14100 1,4 15200 2,9 - 16200 2,0	6,2 15,4 7,0 9,6 6,9 11,8 6,5 8,1	25,6 7,2 31,2 8,6 36,2 7,9 38,3 7,3	1,47 1,51 1,44 1,44
herstel- lungs- feucht, in Folie, dann bei 60°C ge- trocknet	7 28	- -	11300 5,6 9200 2,3	6,7 10,1 5,8 12,3	41,5 4,0 33,6* 4,1	1,51 1,51
Klima 20/65 offen	28 90 180	1,67 1,66 1,60	13500 1,7 - 14800 13,4	3,9 10,6 6,6 12,7 6,4 5,9	31,1 6,2 39,9 5,8 36,6 10,2	1,47 1,51 1,49
Klima 20/99 offen	28 90 180	1,80 1,82 1,81	15400 3,5 - 19400 4,7	7,3 6,2 6,9 2,7 7,0 8,4	29,3 10,7 35,1 5,6 35,4 10,2	1,49 1,48 1,45
Wasser- lagerung	28 90 180	1,82 1,82 1,78	16100 3,1 - 18000 1,5	7,2 8,1 7,2 6,6 6,4 8,0	29,0 6,6 34,1 10,2 33,5 5,9	1,50 1,47 1,42

V = Variationskoeffizient

Der Zuschnitt der Mörtelplatten in Prismen 4 x 4 x 16 cm³ erfolgte 2 Tage nach Herstellung; die Prismen wurden in Folienbeutel eingeschweißt. Nach 7 Tagen wurden entsprechende Prismen der Folie entnommen und in das Klima 20/65 oder 20/99 bzw. in ein Wasserbecken eingelagert, wo sie bis zum Prüftag verblieben.

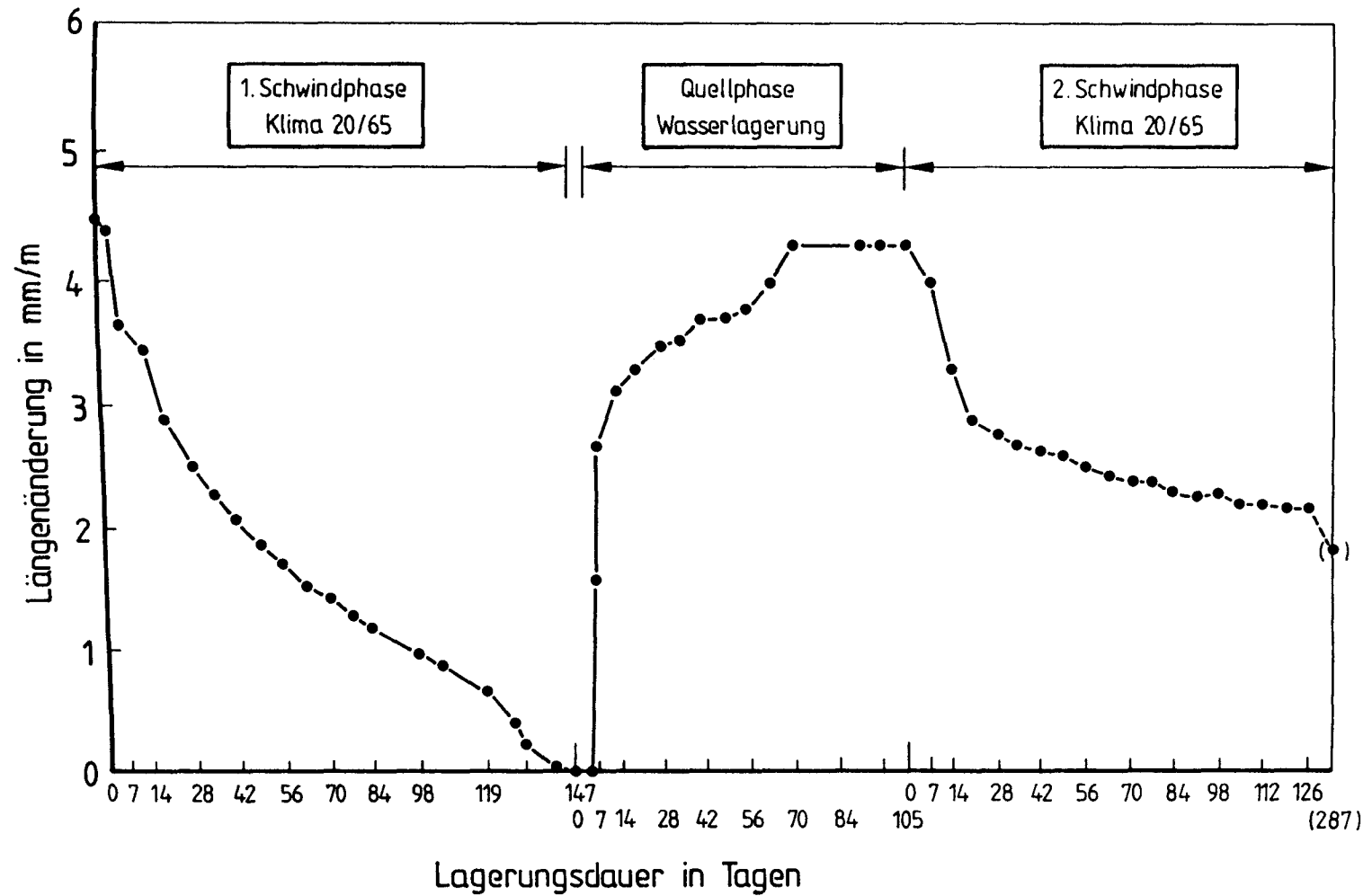
Nach dem Zuschnitt wurden die Prismen in ursprünglicher Anordnung ausgelegt und jeweils alle 5 Prismen fortlaufend beschriftet, so daß jedes Prüflös (n = 3 bzw. 4) aus Prismen verschiedener Mörtelplatten bestand.

* Obwohl die Probenmasse deutlich niedriger war als die feucht geprüfter Prismen, blieb der erwartete Festigkeitsanstieg durch das Trocknen aus; eine Erklärung kann dafür nicht gegeben werden.



Massenänderung MC-modifizierter HGZ-Fasermörtelprismen im Klima 20/65,
bei Wasserlagerung und anschließender Rückklimatisierung im Klima 20/65

(Bezugswert: Endmasse 1. Schwindphase)



Längenänderung MC-modifizierter HGZ-Fasermörtelprismen im Klima 20/65,
bei Wasserlagerung und anschließender Rückklimatisierung im Klima 20/65

(Bezugswert: Endlänge 1. Schwindphase)

Zentrische Zugfestigkeit, Bruchdehnung und dynamischer E-Modul 4 x 4 x 16 cm³
großer Methylcellulose-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtelprismen

(n = 3)

Prüf- alter	Lagerungsart	Rohdichte	dynamischer E-Modul		Zentrische Zugfestigkeit		Bruch- dehnung	Druckfestigkeit (nach 230 d) β_D (n = 4)
			\bar{x}	V	\bar{x}	β_{ZZ} V		
d	-	kg/dm ³	N/mm ²	%	N/mm ²	%	‰	N/mm ²
34 3)	herstellfeucht	1,77	14700	6,5	2,1	17,3	0,31	-
	in Folie							
	21 d in 20/65	1,71	13900	0,7	2,2	1,9	0,33	-
	21 d in 20/99	1,79	15300	2,5	1,8	12,0	0,36 1)	-
	21 d WL	1,79	15700	1,8	1,9	20,9	0,44 2)	-
218 4)	herstellfeucht	1,72	16600	3,3	2,5	9,5	0,32	31,4
	in Folie							
	182 d in 20/65	1,56	13700	5,5	2,4	13,8	0,34	23,1
	182 d in 20/99	1,80	19500	1,0	2,0	10,1	0,23	29,4
	182 d WL	1,80	19400	0,8	1,6	11,2	0,27	34,4

V = Variationskoeffizient; \bar{x} , ϵ = Mittelwert; WL = Wasserlagerung

Bei der Bestimmung der zentrischen Zugfestigkeit trat der Bruch bei allen Prüfkörpern in der freien Länge ein.

- 1) enthält 2 Proben mit ausgeprägtem "Fließbereich" vor dem Bruch, sonst fast Sprödbbruch
- 2) enthält 1 Probe mit ausgeprägtem "Fließbereich" vor dem Bruch, sonst fast Sprödbbruch
- 3) Die Prismen wurden nach Bestimmung des dynamischen E-Moduls an jeder Stirnseite um 5 mm gekürzt (Entfernung Koppelfett). Auf 2 Längsseiten wurden Dehnmeßstreifen (Meßgitterlänge 20 mm) und an den Stirnseiten Stahlzugplatten mit Kleber Plex/Pleximon aufgeklebt. Bei der Prüfung löste sich vor dem Bruch der Prismen jeweils eine Zugplatte, so daß nach weiterem Schnitt je Stirnfläche, Säubern und Anrauen die Zugplatten neu mit Kleber Konkretin SK 41 aufgeklebt wurden
- 4) siehe 3), nach Kleben mit Konkretin SK 41 lösten sich beim 1. Be-lasten einseitig einige Zugplatten; Nachkleben mit Kleber Ciba Geigy XB 3074.

Prüfung auf Frostwiderstandsfähigkeit
Methylcellulose-modifizierter HGZ-Fasermörtelprismen
nach 50 Frost-Tau-Wechseln

Meßgrößen		Prüflos 1 (n = 4)		Prüflos 2 (n = 4)	
		\bar{x}	V	\bar{x}	V
Vorbehandlung		88 Tage 20/65 + 5 Tage Wasser- lagerung		93 Tage Wasser- lagerung	
Dynamischer E-Modul vor FTW	N/mm ²	15000	1,4 %	19100	0,9 %
Feuchtigkeit vor Beginn FTW	M.-%	26,4	1,3 %	30,6	1,9 %
Dynamischer E-Modul nach 50 FTW	N/mm ²	15200	0,8 %	17700	2,3 %
Rohdichte	kg/dm ³	1,81	1,3 %	1,81	1,8 %
Biegezugfestigkeit nach 50 FTW	N/mm ²	4,4	3,8 %	7,0	7,6 %
Druckfestigkeit nach 50 FTW	N/mm ²	32,6	8,1 %	33,9	9,0 %
Trockenrohichte	kg/dm ³	1,44	1,1 %	1,38	2,2 %
Prüffeuchtigkeit	M.-%	26,2	1,3 %	30,3	1,6 %

V = Variationskoeffizient

Nach 50 Frost-Tau-Wechseln wurden an keinem der dicht in Folie eingeschweißten Prismen 4 x 4 x 16 cm³ Risse oder Absplitterungen festgestellt.

Die Massedifferenz der Prismen vor und nach den 50 FTW betrug höchstens 1,2 g und im Mittel 0,8 g (V = 21 %); sie entstand durch Feuchtigkeitsaustritt aus den Prismen.

Mechanische Eigenschaften 4 x 4 x 16 cm³ großer Normprismen
aus gespritztem Zentrival FM 20-Mörtel (n = 4)

Prüfalter	Lagerungsart (vorher bis 7. Tag unter Folie)	dyna- mischer E-Modul	Rohdichte	Biegezug- festig- keit	Druck- festig- keit
Tage	-	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²
7	herstellungsfeucht, bei 60°C getrockn. ¹⁾	35900 -	2100 1980	5,2 9,6	32,3 57,0
28	herstellungsfeucht	35600	2075	5,9	48,0
	21 d in 20/65	32200	2075	8,1	46,6
	21 d in 20/99	36000	2125	7,5	40,8
	21 d WL	35800	2130	7,6	41,6
	28 d herstellungs- feucht, dann bei 60°C getrocknet	35100	1955	9,1	72,1
90	herstellungsfeucht	37000	2095	6,2	53,4
	83 d in 20/65	31700	2070	7,7	45,2
	83 d in 20/99	36500	2155	8,5	47,0
	83 d WL	37300	2140	8,4	50,4
180	herstellungsfeucht	34000	2080	7,4	61,0
	173 d in 20/65	30200	2055	7,7	57,9
	173 d in 20/99	36400	2155	9,4	57,0
	173 d WL	38000	2135	8,8	51,7

1) Vorher bis 7. d herstellungsfeucht;

WL = Wasserlagerung

- Anlage 23 -

Zentrische Zugfestigkeit 4 x 4 x 16 cm³ großer Normprismen
aus gespritztem Zentrival FM 20-Mörtel (n = 3)

Prüfalter	Lagerungsart	Rohdichte	Zentrische Zugfestigkeit			Druckfestigkeit
			\bar{x}	V	ϵ	
Tage	-	kg/m ³	N/mm ²	%	0/00	N/mm ²
67	herstellungsf.	-	1,7	38,8	0,060	-
64	57 d in 20/65	-	2,0	4,3	0,080	-
67	60 d in 20/99	-	1,6	63,5	0,060	-
70	63 d WL	-	1,7	19,1	0,056	-
1) 124 2)	Wiederholung mit auf l = 115 mm gekürzte Prismen					
	60 d herstellungsf.	-	3,0	24,7	0,127	50,8
124	57 d in 20/65	-	2,7	18,1	0,104	39,4
124	60 d in 20/99	-	4,3	6,6	0,163	63,6
124	63 d WL	-	3,0	21,4	0,200	39,4
238 3) 2)	herstellungsfeucht (188 d)	2090	3,1	17,7	0,122	-
238	188 d in 20/65	2040	3,5	16,7	0,153	-
238	188 d in 20/99	2145	2,9	25,9	0,108	-
238	188 d WL	2135	3,8	14,3	0,150	-

x = Mittelwert

V = Variationskoeffizient; WL = Wasserlagerung

ϵ = Bruchdehnung

- 1) Da in der Bruchfläche bei der 1. Prüfung nahe der oberen bzw. unteren Stirnfläche häufig Inhomogenitäten sichtbar waren und deshalb diese Meßwerte nicht materialtypisch sind, wurden die Prismen beidseitig um je etwa 23 mm gekürzt und erneut geprüft.
- 2) In der dazwischen liegenden Zeit lagerten die Prüfkörper im Raumklima.
- 3) Die Prismen wurden beidseitig um je etwa 20 mm gekürzt.

- Anlage 24 -

Frostwiderstandsfähigkeit 4 x 4 x 16 cm³ großer Normprismen
aus gespritztem Zentrival FM 20-Mörtel

Meßgrößen	Prüfgruppe 1 (n = 4)	Prüfgruppe 2 (n = 3)
Vorbehandlung -	100 d in 20/65 + 5 d WL	106 d Wasser- lagerung
Dynamischer E-Modul N/mm ² vor FTW	36200	35500
Wasseraufnahme vor FTW M-%	3,4	-
Absprengungen nach 15 FTW	g M-% 0,98 0,17	g M-% 1,23 0,22
nach 35 FTW	0,35 0,06	0,27 0,05
nach 50 FTW	0,72 0,13	0,37 0,07
Masseabnahme gesamt	2,05 0,36	1,87 0,34
Dynamischer E-Modul nach FTW N/mm ²	36800	35800
Biegezugfestigkeit nach FTW N/mm ²	7,5 (V = 11,9%)	9,3 (V = 6,2 %)
Druckfestigkeit nach FTW N/mm ²	41,0 (V = 10,5 %)	44,3 (V = 9,5 %)
Prüffeuchtigkeit M-%	7,7	10,0

V = Variationskoeffizient

Die Angabe der "Masseabnahme" in Gramm betrifft den nassen Zustand. Bei der Angabe in M.-% wurde die Trockenmasse der "Absprengungen" auf die berechnete Trockenmasse der Prismen vor Beginn der FTW-Belastung bezogen.

ernative Mörtel (gemittelte Festmörteleigenschaften und Längenänderung herstellfeucht ab 2. Tag)

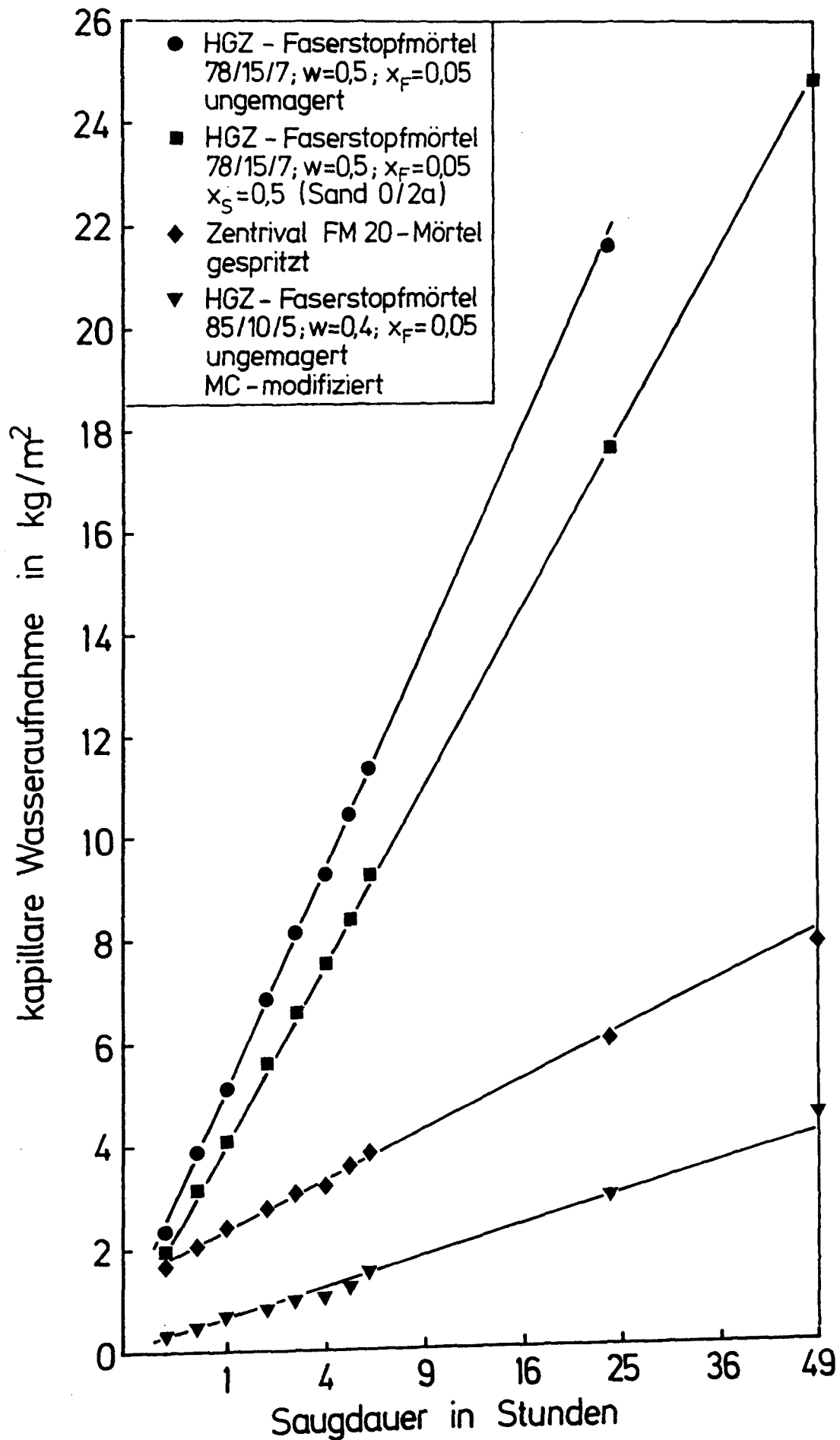
Alternative Mörtel		Rezeptur		Feuchtrohdichte		Trockenrohdichte		dynamischer E-Modul		Biegezugfestigkeit nach 28 d (n = 3)		Druckfestigkeit nach 28 d (n = 6)		Schwinden (-) Quellen (+) 3) (n = 3)
		Mischungsverhältnis		herstell- feucht	20/65 *	herstell- feucht	20/65 *	herstell- feucht	20/65	herstell- feucht	20/65 *	herstell- feucht	20/65 *	
		Sand/BM	Wasser/BM											
-		x _S	W	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	10 ³ N/mm ²	10 ³ N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	mm/m
gemagerter HGZ-Mörtel, ohne Fasern (Versuch 40) (Sand 0/2 b)	\bar{x} V	0,5	0,31	2,13 1,4 %	2,04 0,2 %	-	-	31,4 1,5 %	31,2 1,8 %	7,9 9,5 %	3,3 5,8 %	37,4 2,4 %	43,0 1,8 %	+ 0,423
gemagerter HGZ-Mörtel, ohne Fasern (Sand 0/2 b)	\bar{x} V	1,5	0,33	2,22 0,6 %	2,14 0,3 %	-	-	35,6 2,2 %	34,1 0,6 %	6,3 4,1 %	3,7 8,9 %	31,7 5,4 %	34,1 2,8 %	+ 0,272
gemagerter HGZ-Mörtel, ohne Fasern 1 % LP-Mittel-Zugabe, bzg. auf BM (Addiment)	\bar{x} V	1,5	0,30	2,03 0,4 %	1,97 0,3 %	1,80 0,4 %	1,81 0	29,8 3,3 %	27,7 1,4 %	5,2 13,7 %	3,0 7,3 %	37,7 2,1 %	40,3 3,3 %	+ 0,835
Tubag-Traß-Mörtel, ohne Fasern	\bar{x} V	-	0,14 1)	1,52 0,2 %	1,65 1,8 %	1,48 2)		9,6 1,5 %	14,0 4,2 %	1,6 4,0 %	3,8 8,9 %	4,3 4,5 %	11,2 7,3 %	Proben defekt
Tubag-Saniermörtel für gipshaltiges Mauerwerk, ohne Fasern	\bar{x} V	-	0,14 1)	1,79 1,8 %	1,67 0,3 %	1,72 2)		13,8 1,9 %	21,6 5,1 %	1,8 9,3 %	0,80 7,5 %	6,3 1,7 %	3,0 3,9 %	+ 0,024
Colfirmit 8434, ohne Fasern (Fa. Colfirmit Rajasil GmbH)	\bar{x} V	-	0,18 1)	1,81 0,1 %	1,65 0,2 %	1,60 0,3 %	1,63 0,2 %	9,5 2,4 %	9,2 3,8 %	1,2 0,8 %	2,2 6,0 %	3,5 3,2 %	6,4 4,8 %	+ 0,055
Mineralisch-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel; x _F = 0,05 (Versuch 30)	\bar{x} V	-	0,40	1,73 1,3 %	1,61 2,7 %	1,49	1,47	20,6 6,4 %	13,2 7,4 %	6,4 10,8 %	5,5 20,2 %	30,4 6,6 %	28,0 23,8 %	- 0,025

* bis 7. Tag Nachbehandlung (in Folie)

1) Wasser/Trockenmörtel-Verhältnis

2) berechnet aus Feuchtdichte (herstellfeucht gelagert) und dem Wassergehalt aus Feuchtebilanz der Versuche Nr. 27 und 28

3) nach 2 Tagen entschalt, dann 8 Tage lang gemessen (Proben in Folie)



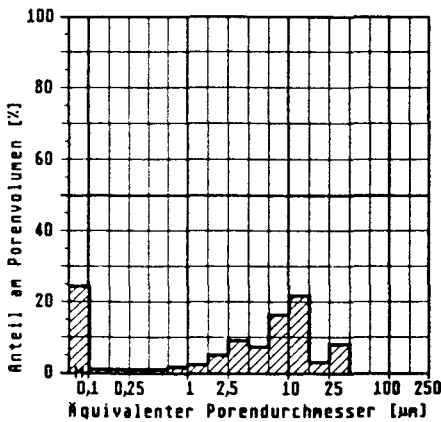
Eigenschaften verwendeter Natursteine /20/

Natursteinart	Abbauort/Alter	Megaskopischer Überblick	Mikroskopische Charakteristik				
			Komponenten	Bindemittel	sichtbarer Porenraum	Struktur	Diagenese
Sander Schilfsandstein 2)	Sand am Main, Oberfranken (Mittlerer Keuper 205 Mio Jahre)	grau bis olivgrün, fein- bis mittelsandig, Schichtung kaum erkennbar	78 %; davon 54 % Quarz, 32 % Bruchstücke 7 % Plagioklas 3 % Feldspat	8 %; tonig-chloritische Kornhüllen; tlw. direkte kieselige Bindung	14 %; meist 0,15 mm; Interpartikelporen, tlw. Auskleidung bzw. Füllung mit Chlorit 3)	Korngröße 0,1 bis 0,4 mm; längliche und punktu-elle, selten suturierte Kornkontakte	kieselige Kornkontakte bzw. über tonig-chloritisches Bindemittel; 60 % des Kornumfanges im Kontakt; tlw. Chlorite in Zwickeln
Elmkalkstein 1)	Königsutter am Elm, Ostniedersachsen (unterer Muschelkalk 215 Mio Jahre)	hellbräunlich-grau fein- bis grobkörnig, feinporig; tlw. Lagen mit grobem Fossilschutt; hier größere Poren	49 %; davon 98 % Pelloide (0,1 ... 0,2 mm) 2 % Biogene (meist 0,5 mm)	35 %; sparitischer Zement; Zementation stellenweise unvollständig (Poren)	etwa 16 %; Interpartikel- und Partikellösungsporen	fein- bis grobporös, abhängig von Komponentengröße; lagenweise wechselnd	2 Zementgenerationen; Sammelkristallation am Zement und Komponenten
Rüthener Grünsandstein 1)	Rüthen, Sauerland (Oberkreide, unteres Cenoman 100 Mio Jahre)	graugrün, mittelsandig fein- bis mittelporig Fe (OH) ₃ -Minerale als kleine braune Körner	69 %; davon 77 % Quarz 13 % Glaukonit 6 % Bruchstücke 4 % Fe (OH) ₃	10 %; barytisch-kieselig-tonig; Tonminerale tlw. als dünne Häutchen um Komponenten	21 %; meist Interpartikel-, auch Intrapartikelporen, ≤ 0,7 mm, meist 0,2 mm	Korngröße 0,04 bis 1,5 mm, meist 0,3 mm; suturierte Kornkontakte, punktförmige selten	authigene Materialneu- und -umbildungen; Drucklösungen
Herdecker Ruhsandstein 2)	Herdecke, Ruhrtal, Westfalen (Oberkarbon 325 Mio Jahre)	hellgrau, mittelsandig, dicht erscheinender Sandstein	86 %; davon 63 % Quarz 19 % Bruchstücke 12 % Feldspat 4 % Muscovit	14 %; kieselig-tonig; mikrogranulare Quarzteile und Anwachssäume um Komponenten	nicht vorhanden	Korngröße 0,15 bis 0,65 mm; meist 0,35 mm; meist suturierte Kornkontakte	Verzahnung der Körner durch Drucklösung und Anwachssäume
Velpker Sandstein 1)	Velpke, östl. Wolfsburg, Ostniedersachsen (oberer Keuper, Rhät, 200 Mio Jahre)	hellgrau bis bräunlich, fein- bis mittelsandig, kieseliger Sandstein	83 %; davon 85 % Quarz 13 % Bruchstücke 1 % Feldspat	6 %; meist suturierte Kornkontakte und Anwachssäume, tonig-limonitische Kornüberzüge	11 % Interpartikel- und Partikellösungsporen; meist 0,05 bis 0,1 mm; Porenwände oft mit tonigen Belägen	Korngröße 0,07 bis 0,3 mm suturierte Kornkontakte	Drucklösungen an Quarzen und Bruchstücken; Neubildung von Kaolin in Poren

1) gut verwitterungsbeständig 2) gut, z. T. mäßig verwitterungsbeständig 3) glimmerähnliche Mg, Fe, Al-Silikate

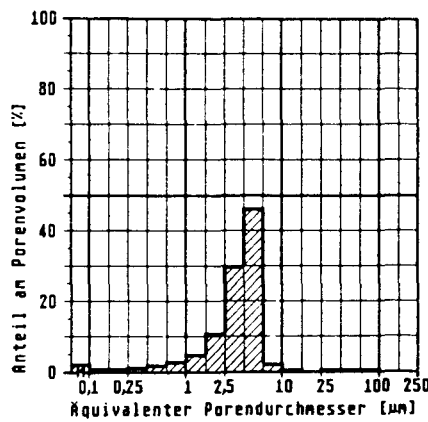
Porendurchmesser-Verteilung und weitere physikalische Eigenschaften
verwendeter Natursteine (nach /20/)

Porendurchmesser-Verteilung



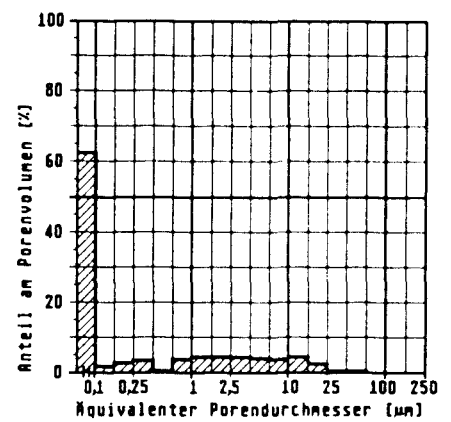
Rühener Grünsandstein (RGS)

Porendurchmesser-Verteilung



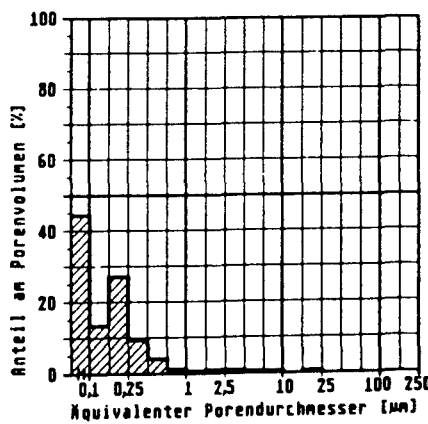
Elmkalkstein (EK)

Porendurchmesser-Verteilung



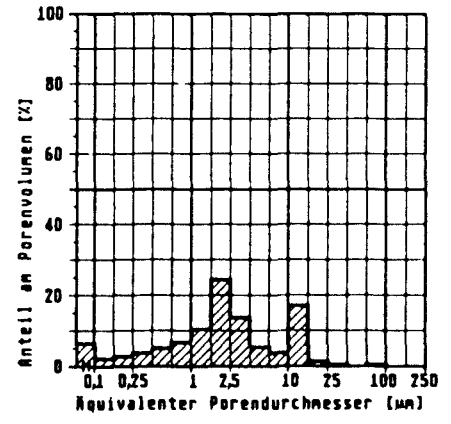
Sander Schilfsandstein (SSS)

Porendurchmesser-Verteilung



Herdecker Ruhrsandstein (HRS)

Porendurchmesser-Verteilung



Velpker Sandstein (VS)

Gesteinsdichte, Porenraum, Porenfüllung:		RGS	EK	SSS	HRS	VS
— Dichte, rein	(g/cm ³)	2.73	2.71	2.66	2.68	2.65
— Dichte, roh	(g/cm ³)	2.08	2.04	2.13	2.52	2.29
— Porosität	(Vol. %)	23.97	24.64	19.99	6.09	13.80
— Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	(Gew. %)	7.04	4.07	6.45	1.80	2.78
— Wasseraufnahme unter Vakuum	(Gew. %)	11.57	12.06	9.39	2.41	6.04
— Sättigungsgrad	(—)	0.61	0.38	0.69	0.75	0.46
— Luftpermeabilität	(mD)	706.000	7.120	—	0.009	39.100
— Spezifische Oberfläche	(m ² /g)	6.34	0.82	—	3.16	0.82

Eigenschaften verwendeter Natursteine nach Literaturangaben

Natursteinart	Rohdichte	Reindichte	Porosität	Wasser- aufnahme	Wasser- aufnahme- koeffizient	Hygrische Dehnung	Wärme- dehn- koeffizient	Zugbelastung		Druckbelastung	
								E-Modul	Zugfestigkeit	E-Modul	Druckfestigkeit
-	kg/dm ³	kg/dm ³	V-%	M.-%	kg/m ² h ^{0,5}	mm/m	10 ⁻⁶ m/m K ⁻¹	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
Sander 1) /24/ Schilf- /14/ sandstein /33/	2,00 - 2,19	2,61	15,3 - 21,4 13 - 24	4,5 - 8,2 6,2 - 6,5	1,6 - 7,1 0,5 - 5,8			1000 - 11000	2 - 3 2) 0,2 - 3,0	9000 - 11000 4) 1000 - 8000	65 - 78 3) 22 - 60 50 - 73 /24/
Rüthener /33/ Grünsandstein				9,0 - 9,5	17 - 20						
Regensburger /14/ Grün- sandstein			14 - 23	3,9 - 7,6	0,8 - 3,2		7,5 - 9				
Sandstein /32/ allgemein					3 - 7,2	0,3 - 0,6	12		0,5 - 2,5		
Kalkstein /14/ /32/ Dolomit Quarz /14/						0,09 - 0,16	7,0 7,0 14,0		1 - 4 3 - 6		

1) innere Oberfläche: 8,5 m²/g

2) parallel zur Schichtung sind Werte um 10 ... 20 % höher als senkrecht zur Schichtung

3) senkrecht zur Schichtung sind Werte etwas höher als parallel zur Schichtung

zu /24/: Ergebnisse sind abhängig von Varietät und Steinbruch (Schilfsandsteine Baden-Württemberg)

4) dynamischer E-Modul etwa um 35 % größer als statischer E-Modul /24/

Natursteine zur Herstellung von Doppelstein-Probekörpern

Probenformat: 10 x 10 x 20 cm bzw. 9 x 9 x 20 cm
Saugflächen: 10 x 10 cm bzw. 9 x 9 cm
parallel zur Schichtung

Steinfeuchteinhalt bzw. kapillare Wasseraufnahme

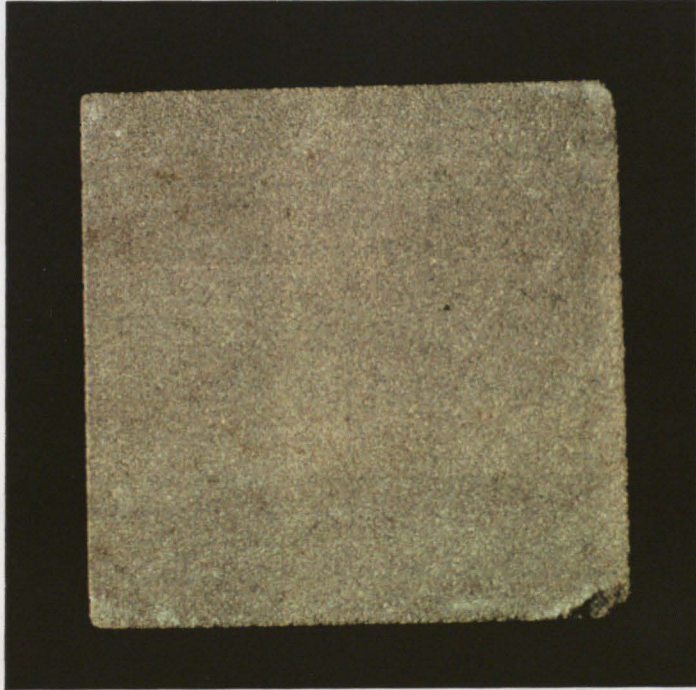


Bild 1: Sander Schilfsandstein,
(Schräglicht)

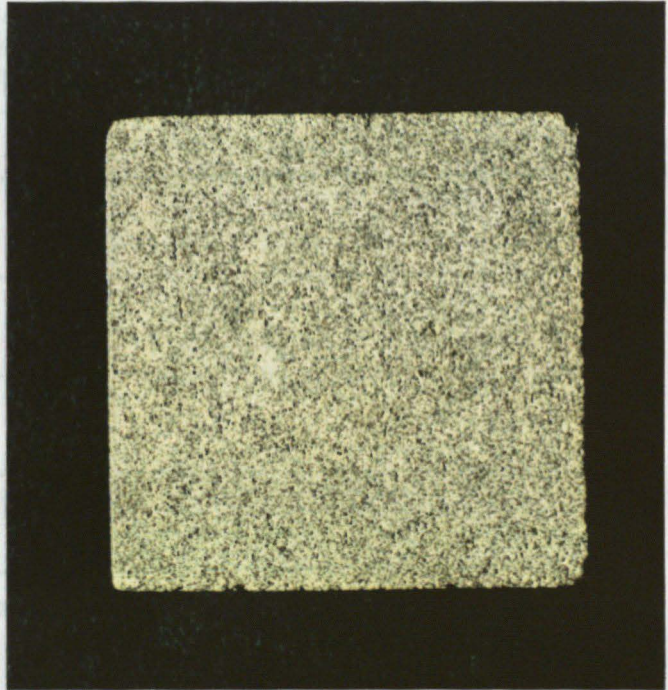


Bild 2: Rühthener Grünsandstein
(Schräglicht)

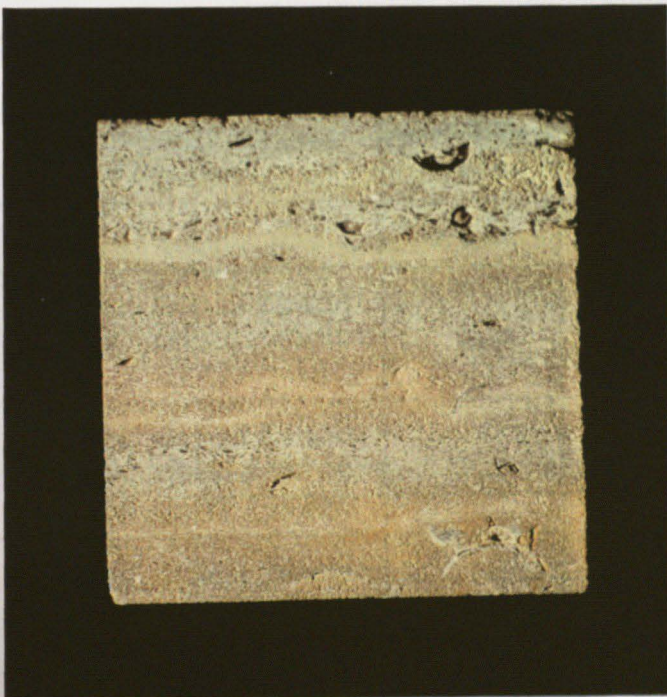


Bild 3: Elmkalkstein
(Schräglicht)



Bild 4: Herdecker Ruhrsandstein
(Schräglicht)

Tabelle A: Kapillare Wasseraufnahme verwendeter Natursteine

Probenformat: 10 x 10 x 20 cm³ bzw. 9 x 9 x 20 cm³
 Saugfläche: 10 x 10 cm² bzw. 9 x 9 cm²
 parallel zur Schichtung

Natursteinart	Steinfeuchtigkeit bzw. kapillare Wasseraufnahme nach kapillarem Befeuchten von *							
	1,5 h		4 h		6 h		22 h	
-	M.-%	kg/m ²	M.-%	kg/m ²	M.-%	kg/m ²	M.-%	kg/m ²
Sander Schilfsandstein	0,9	1,9	1,3	2,8	1,6	3,4	3,2	6,8
Rüthener Grünsandstein	4,2	17,0	6,1	25,2	7,0	28,9	7,0	28,9
Elmkalkstein	0,7	2,5	0,9	3,6	1,1	4,2	1,9	7,1
Herdecker Ruhrsandstein	0,1	0,5	0,1	0,6	0,2	0,8	0,3	1,5

* bezogen auf Trockenmasse; bis zum Versuchsbeginn erhöhte sich die Masse der Versuchsproben von etwa 2 bis 4 kg um etwa 1 ... 2 g.

Tabelle B: Kapillare Wasseraufnahme von Sander Schilfsandstein-Proben, deren Mantelflächen teilweise beschichtet waren

Natursteinart	Kapillare Wasseraufnahme nach kapillarem Befeuchten von				
	24 h	4 d	12,3 d	17,3 d	19,4 d
-	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
Sander Schilfsandstein, beschichtet 1)	5,6	12,5 4)	12,8 5)	-	-
Sander Schilfsandstein, unbeschichtet (n = 3) 2)	7,6	15,1	20,6	22,4	22,1
Sander Schilfsandstein, beschichtet (n = 3) 2) 3)	6,4	13,9	23,9	26,1	26,3

Probenformat 10 x 10 x 20 cm³

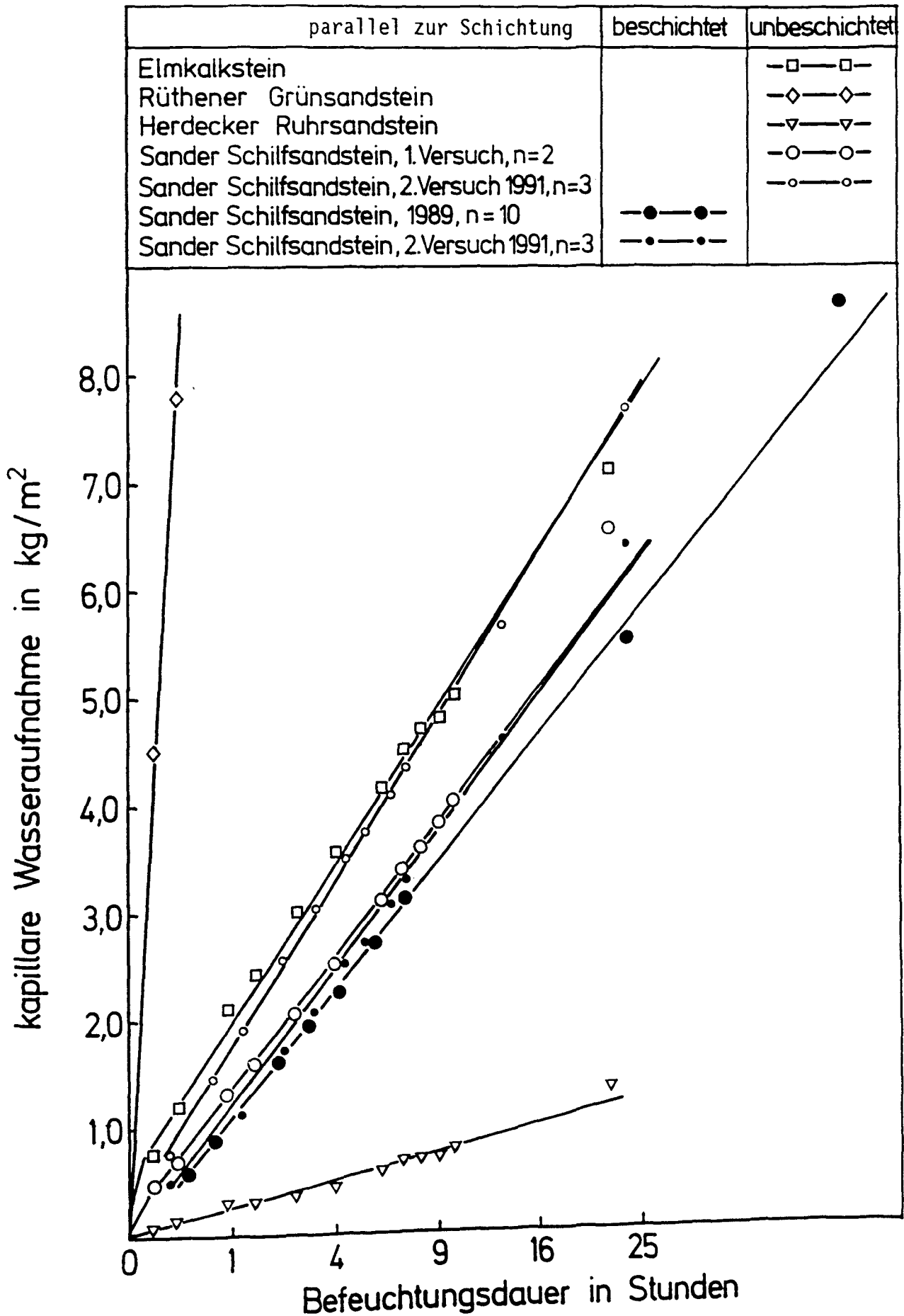
1) Saugfläche 10 x 20 cm², Beschichtung mit Paraffin;
 Mittelwert aus 10 Einzelwerten; senkrecht zur Schichtung

2) Saugfläche 10 x 10 cm², parallel zur Schichtung

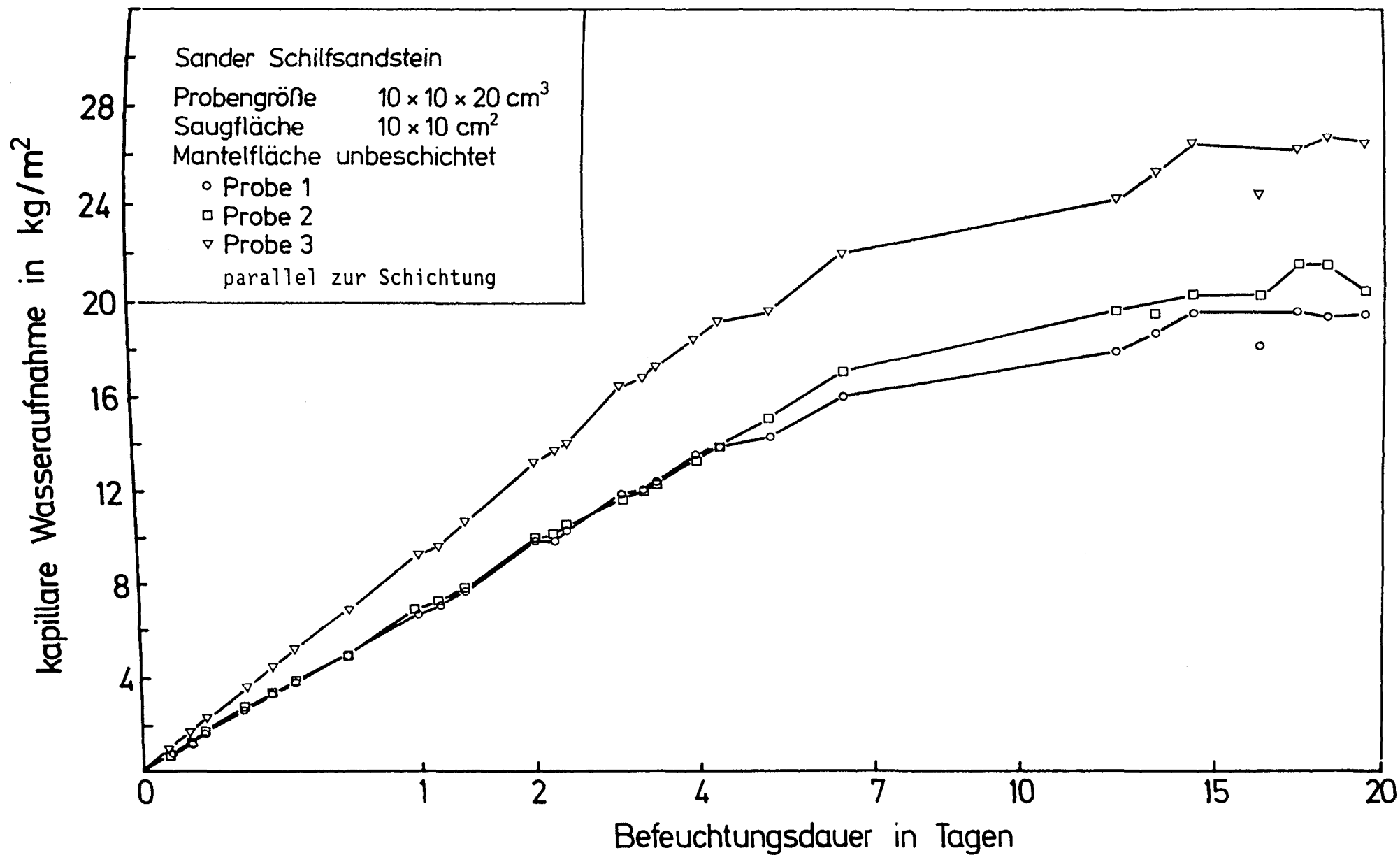
3) Beschichtung mit SIKA ICOSIT 366,

4) 5,2 Tage,

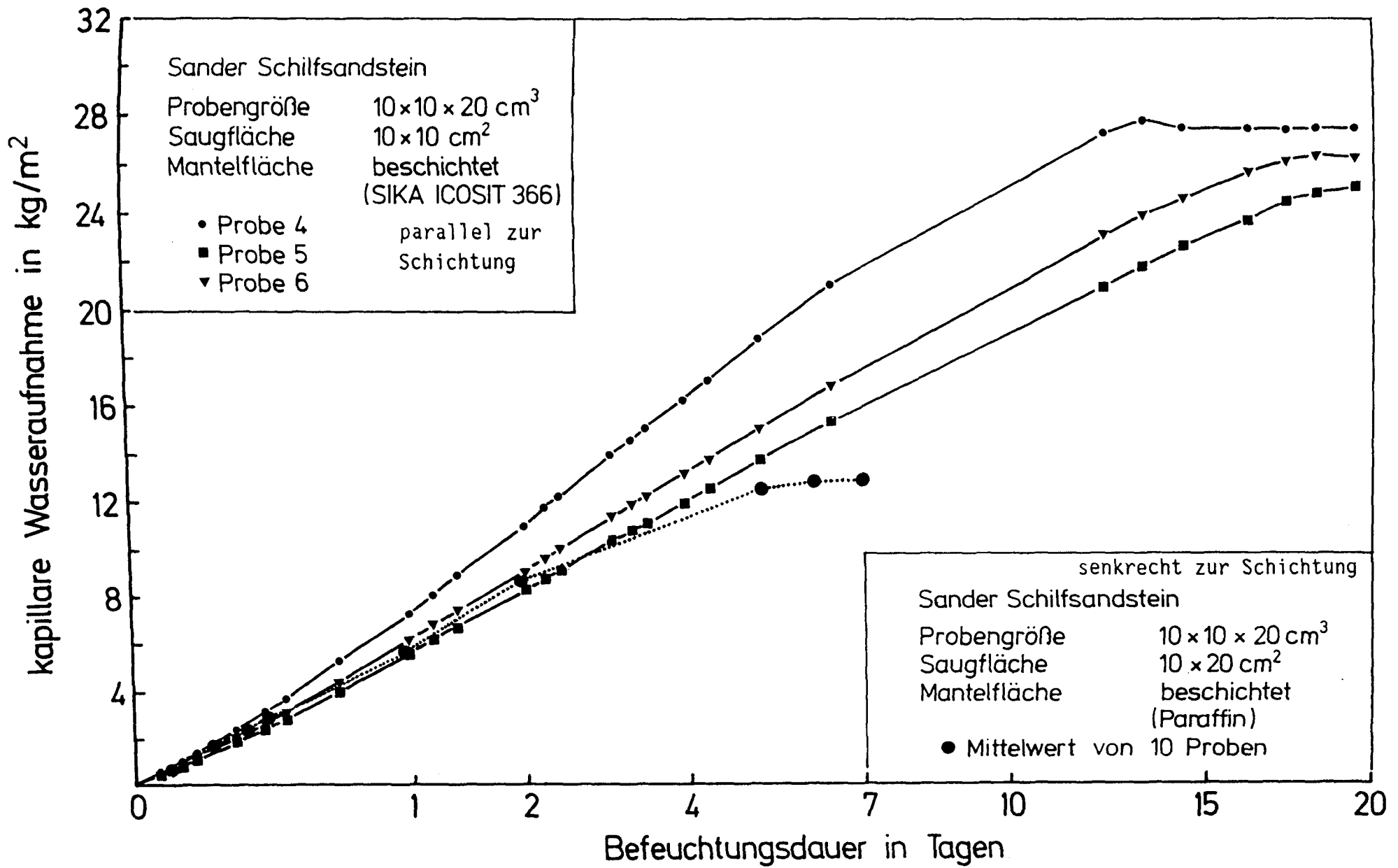
5) 6,2 Tage; nach 7 Tagen 12,9 kg/m² (durchfeuchtet)



Kapillare Wasseraufnahme verschiedener Natursteine



Kapillare Wasseraufnahme von Sander Schilfsandstein (unbeschichtet)



Kapillare Wasseraufnahme von Sander Schilfsandstein (beschichtet)

Wasseraufnahmekoeffizienten verwendeter Natursteine

(Saugfläche: 81 cm² bzw. 100 cm²; h = 20 cm)

Natursteinart	Wasseraufnahmekoeffizient									
	nach Anlage 31		nach Anlage 32				nach Anlage 33			
	Meßdauer 1 h bis 10 h	Meßdauer 1 h bis 22 h	Meßdauer 1 h bis 24 h		Meßdauer 1 d bis 6,4 d		Meßdauer 1 h bis 24 h		Meßdauer 1 d bis 6,4 d	
			xi	\bar{x} V	xi	\bar{x} V	xi	\bar{x} V	xi	\bar{x} V
-	kg/m ² ·h ^{0,5}	kg/m ² ·h ^{0,5}	kg/m ² ·h ^{0,5}	kg/m ² ·h ^{0,5} %	kg/m ² ·h ^{0,5}	kg/m ² ·h ^{0,5} %	kg/m ² ·h ^{0,5}	kg/m ² ·h ^{0,5} %	kg/m ² ·h ^{0,5}	kg/m ² ·h ^{0,5} %
Sander Schilfsandstein	1,25	1,43	1,33 1,38 1,85	1,52 18,8	1,25 1,35 1,70	1,43 16,6	1,59 1,21 1,33	1,37 14,3 1,16 2)	1,84 1,31 1,42	1,52 18,3 1,11 2) 3)
Rüthener Grünsandstein	10,3 1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Elmkalkstein	1,33	1,35	-	-	-	-	-	-	-	-
Herdecker Ruhrsandstein	0,26	0,30	-	-	-	-	-	-	-	-

xi = Einzelwert
 \bar{x} = Mittelwert
V = Variationskoeffizient

- 1) nach 6 Stunden war die 9 x 9 x 20 cm³ große Probe durchfeuchtet
- 2) Berechnung mit Mittelwerten aus 10 Einzelwerten,
Saugfläche 10 x 20 cm², nach 5 Tagen nahezu durchfeuchtet
- 3) Meßdauer 1 d bis 5,2 d

Wasseraufnahme und Quellung verwendeter Natursteine

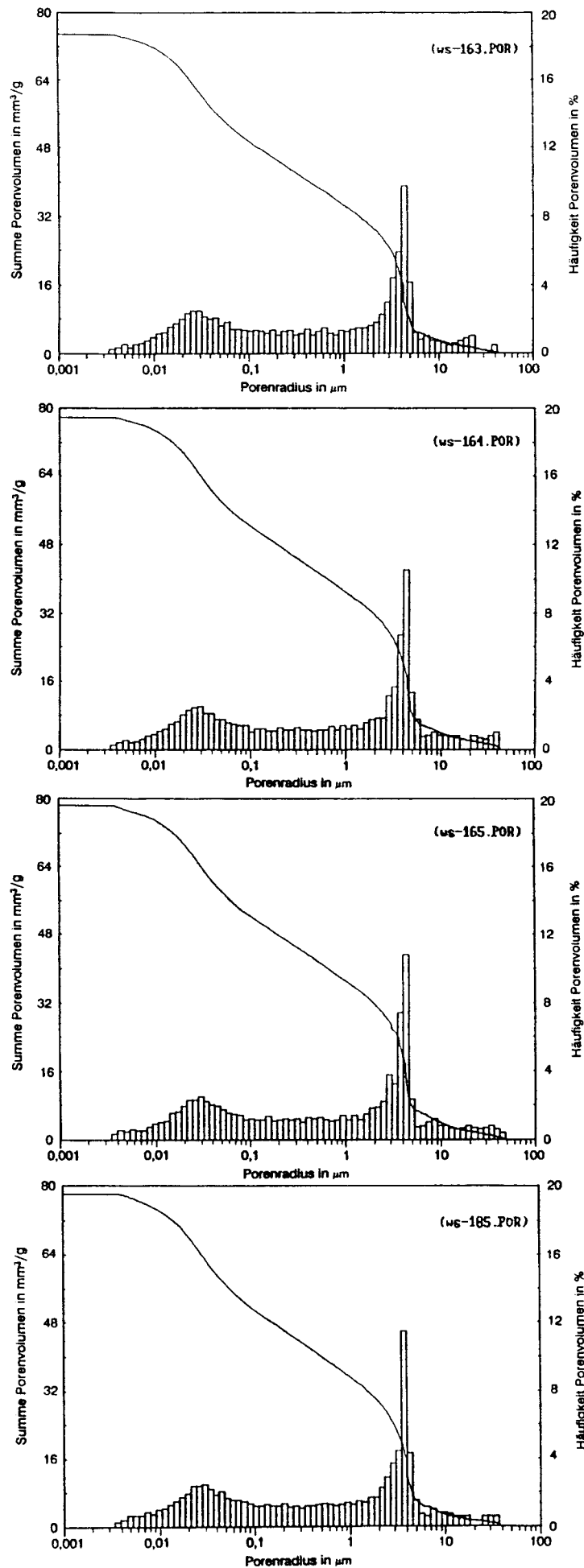
Naturstein- art		Rohdichte trocken	Wasseraufnahme			Längenänderung (Quellung bei Wasseraufnahme)								
			Atmosphären- druck (n = 5)		150 bar (n = 5)	Atmosphärendruck (n = 3)						150 bar (n = 3) 3)		
			nach		nach	Spannweite Einzelwerte		parallel Schichtung n* = 12 1)		senkrecht Schichtung n* = 6 2)		Spannweite Einzelwerte	parallel 1) Schichtung	senkrecht 2) Schichtung
			40 h	114 h	24 h	nach 40 h	nach 114 h	nach 40 h	nach 114 h	nach 40 h	nach 114 h	nach 24 h	nach 24 h	nach 24 h
-		kg/dm ³	M.-%	M.-%	M.-%	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m	mm/m
Sander Schilf- sandstein zementgrau	\bar{x} V	2,19 0,6 %	5,9 1,1 %	6,0 1,0 %	8,1 1,5 %	0,70 bis 1,58	0,83 bis 1,65	0,87 9,9 %	0,98 9,5 %	1,51 4,0 %	1,58 3,2 %	0,80 bis 1,70	0,96 11,1 %	1,62 3,6 %
Sander Schilf- sandstein olivgrün	\bar{x} V	2,12 0,1 %	6,3 1,4 %	6,5 1,5 %	** 8,9 8,6 %	0,60 bis 1,58	0,60 bis 1,58	0,82 16,7 %	0,88 18,0 %	1,45 9,3 %	1,43 9,9 %	0,45 bis 1,53	0,65 25,0 %	1,30 12,8 %
Rüthener Grünsandstein	\bar{x} V	2,06 0,7 %	6,8 4,0 %	7,5 4,5 %	11,3 1,7 %	- 0,08 bis 0,13	- 0,03 bis 0,25	0,04 138 %	0,15 65,7 %	0,02 289 %	0,11 40,5 %	- 0,13 bis 0,15	0,03 313 %	0,01 453 %
Elmkalkstein	\bar{x} V	1,89 4,5 %	5,1 9,7 %	5,3 8,8 %	15,9 5,9 %	- 0,28 bis 0,18	- 0,08 bis 0,15	- 0,07 97,4 %	0,08 62,0 %	- 0,03 361 %	0,03 261 %	- 0,08 bis 0,15	0,01 825 %	0,02 364 %
Herdecker Ruhrsandstein	\bar{x} V	2,52 0,8 %	1,5 11,5 %	1,5 11,6 %	1,9 5,1 %	0,25 bis 0,65	0,23 bis 0,73	0,32 17,4 %	0,37 22,8 %	0,41 31,2 %	0,42 39,5 %	0,18 bis 0,58	0,25 18,6 %	0,38 30,2 %

n = Anzahl Prüfkörper (je 6 Meßstrecken); n * = Anzahl Einzelwerte;

** n = 3: \bar{x} = 9,4 M-% (V = 1,6 %)

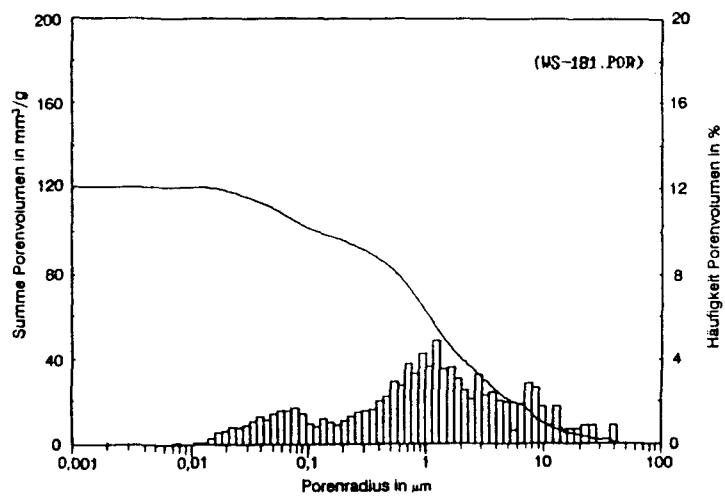
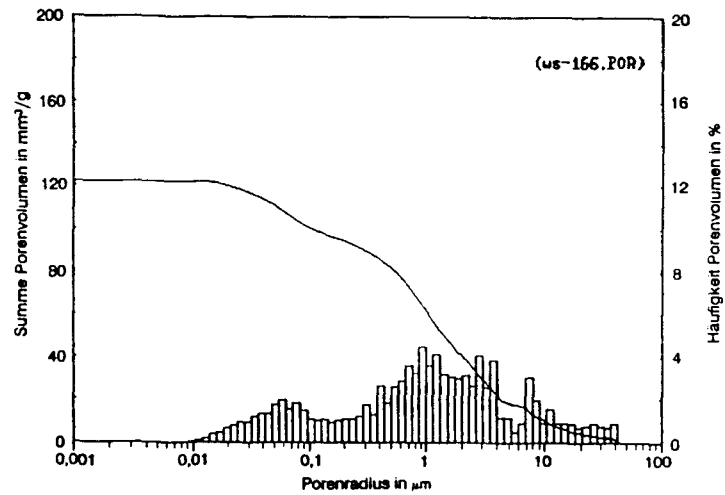
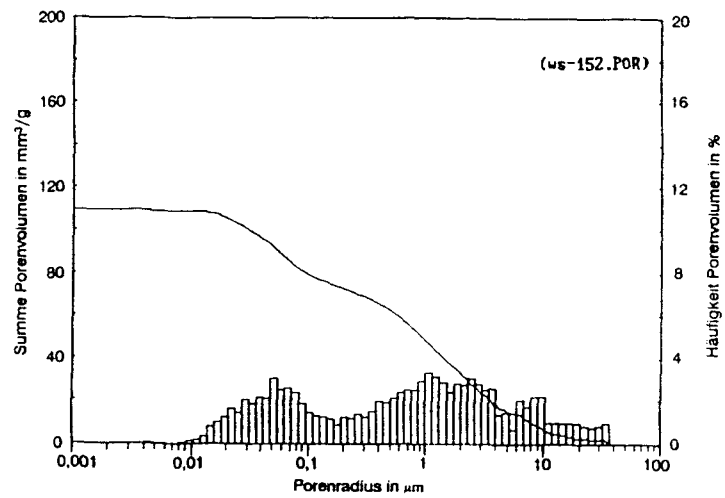
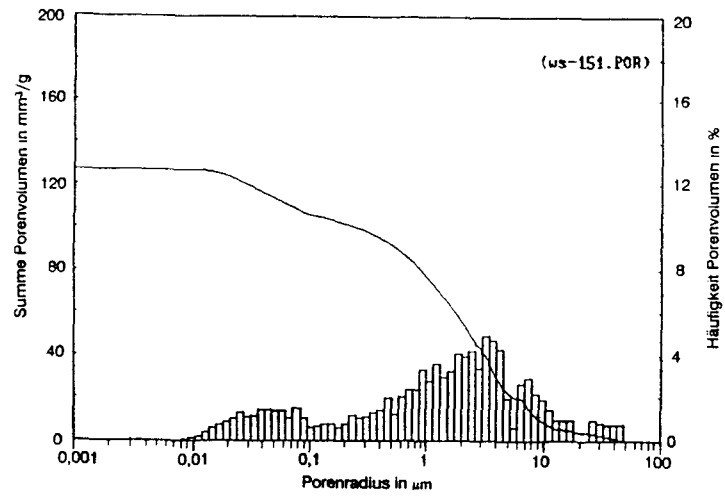
1) 4 Meßstrecken (12 Einzelwerte); 2) 2 Meßstrecken (6 Einzelwerte)

3) Messung der Δ 1-Meßstrecken erfolgte frühestens 28 Tage nach Ende der Behandlung bei 150 bar bei ausreichender Naßlagerung der Proben

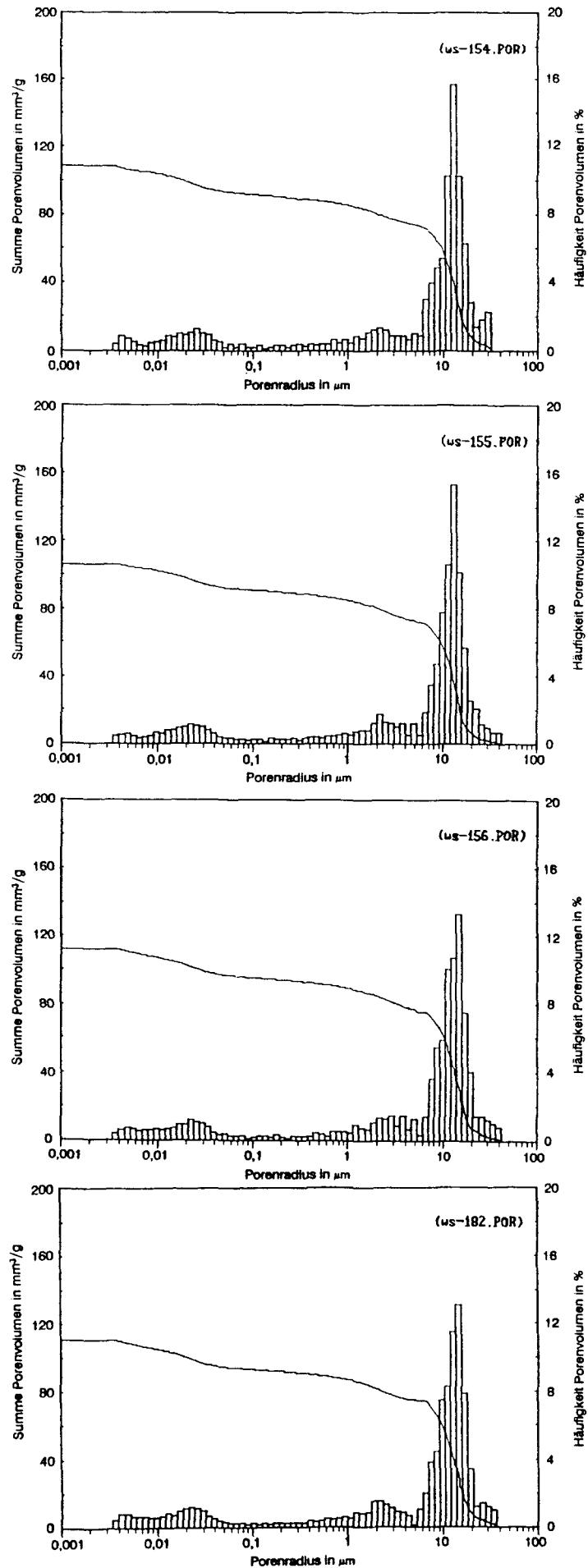


Summenkurve des spezifischen Porenvolumens und Häufigkeit der Porenvolumen abhängig vom Porenradius

Natursteinart: Sander Schiffsandstein

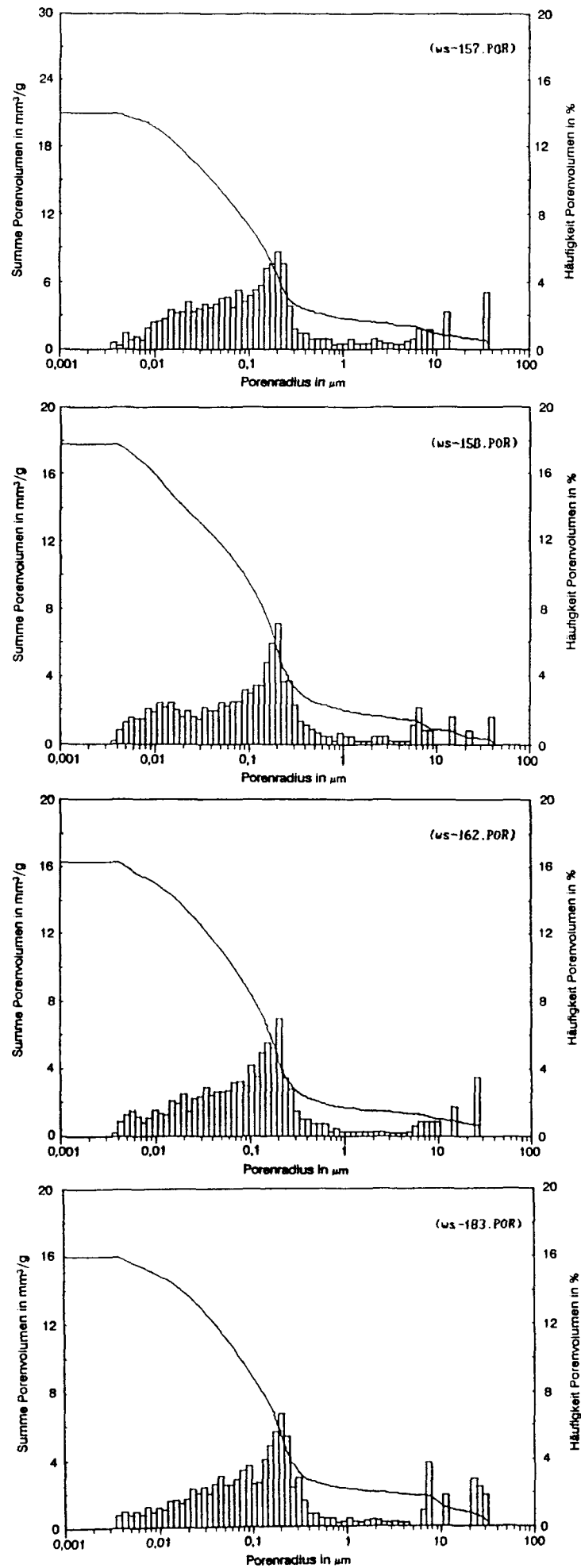


Summenkurve des spezifischen Porenvolumens und Häufigkeit der Porenvolumen abhängig vom Porenradius

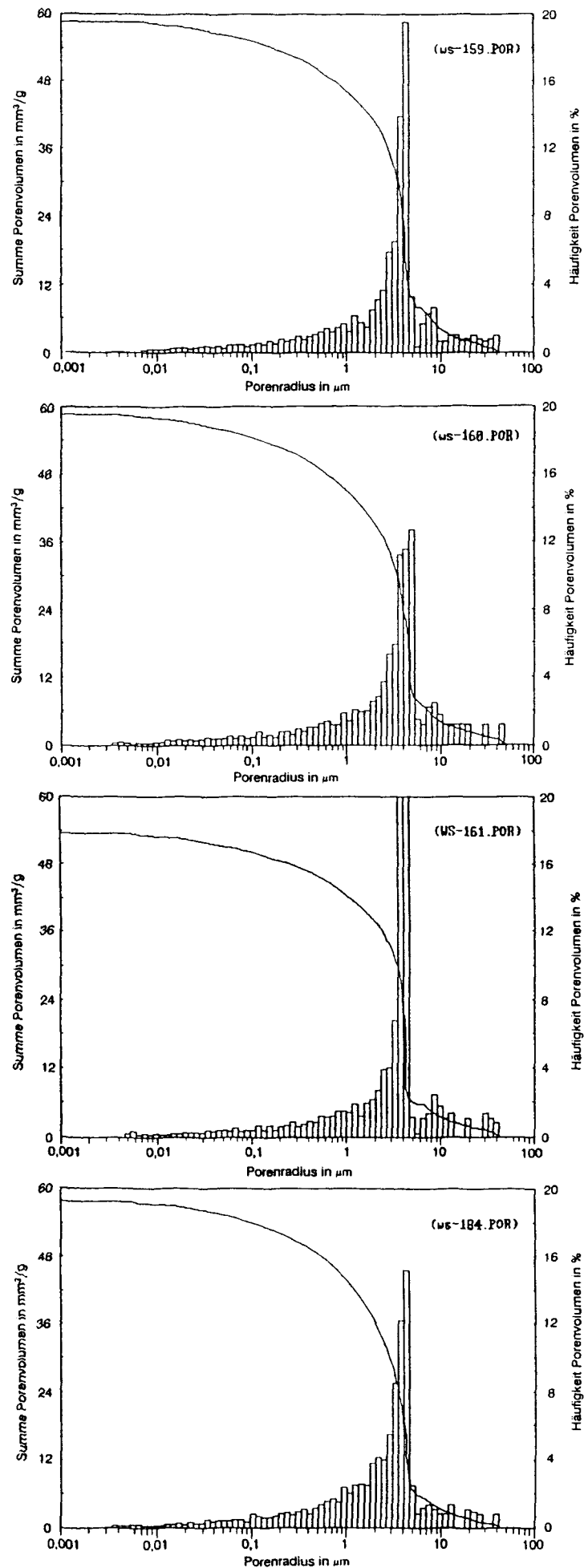


Summenkurve des spezifischen Porenvolumens und Häufigkeit der Porenvolumen abhängig vom Porenradius

Natursteinart: Rùthener Grùnsandstein



Summenkurve des spezifischen Porenvolumens und Häufigkeit der Porenvolumen abhängig vom Porenradius



Summenkurve des spezifischen Porenvolumens und Häufigkeit der Porenvolumen abhängig vom Porenradius

Natursteinart: Velpker Sandstein

Porositätsmessungen verwendeter Natursteine (Hg-Porosimeter 2000)

Natursteinart	Proben-Nr.	Gesamtporen- volumen (n = 4) Verhältnis		Spezifische Oberfläche der Poren (n = 4) Verhältnis		Reindichte 1)	Rohdichte trocken lufttrocken		Gesamtporosität Verhältnis 1) *		
-	-	mm ³ /g	%	m ² /g	%	kg/dm ³	kg/dm ³		Vol.-%	%	Vol.-%
Sander Schilfsandstein	1	74,8		2,76		-	(n = 14)		-		
	2	77,9		2,84		-			-		1)
	3	78,3		2,92		-			-		
	4	78,2		3,14		2,64 2,68			17,1	100	20,1
	\bar{x} V	77,3 2,2 %	100	2,92 5,6 %	100		2,18 1,5 %	2,18 1,4 %			
Elmkalkstein	1	127,3		1,58		-	(n = 12)		-		
	2	109,2		1,98		-			-		
	3	122,4		1,41		-			-		
	4	120,9		1,28		2,71 2,71			24,7	144	35,4
	\bar{x} V	120,0 6,4 %	155	1,56 19,5 %	53		1,93 2,4 %	1,93 2,4 %			
Rüthener Grünsandstein	1	108,6		2,78		-	(n = 5)		-		
	2	106,4		2,53		-			-		
	3	112,3		2,95		-			-		
	4	110,9		3,19		2,74 2,73			23,3	136	21,5
	\bar{x} V	109,6 2,4 %	142	2,86 9,7 %	98		2,04 1,1 %	2,04 1,1 %			
Herdecker Ruhrsandstein	1	21,0		1,08		-	(n = 13)		-		
	2	17,8		1,13		-			-		
	3	16,3		0,93		-			-		
	4	16,0		0,84		2,67 2,66			4,1	24	5,7
	\bar{x} V	17,8 12,8 %	23	1,00 13,4 %	34		2,52 0,2 %	2,52 0,2 %			
Velpker Sandstein	1	58,6		0,38		-			-		
	2	58,6		0,54		-			-		
	3	53,6		0,44		-			-		
	4	57,8		0,51		2,64 -			13,2	77	-
	\bar{x} V	57,1 4,2 %	74	0,47 15,3 %	16		-	-			

V = Variationskoeffizient

1) Ergebnisse nach /29/ (Pyknometermethode mit n - Heptan)

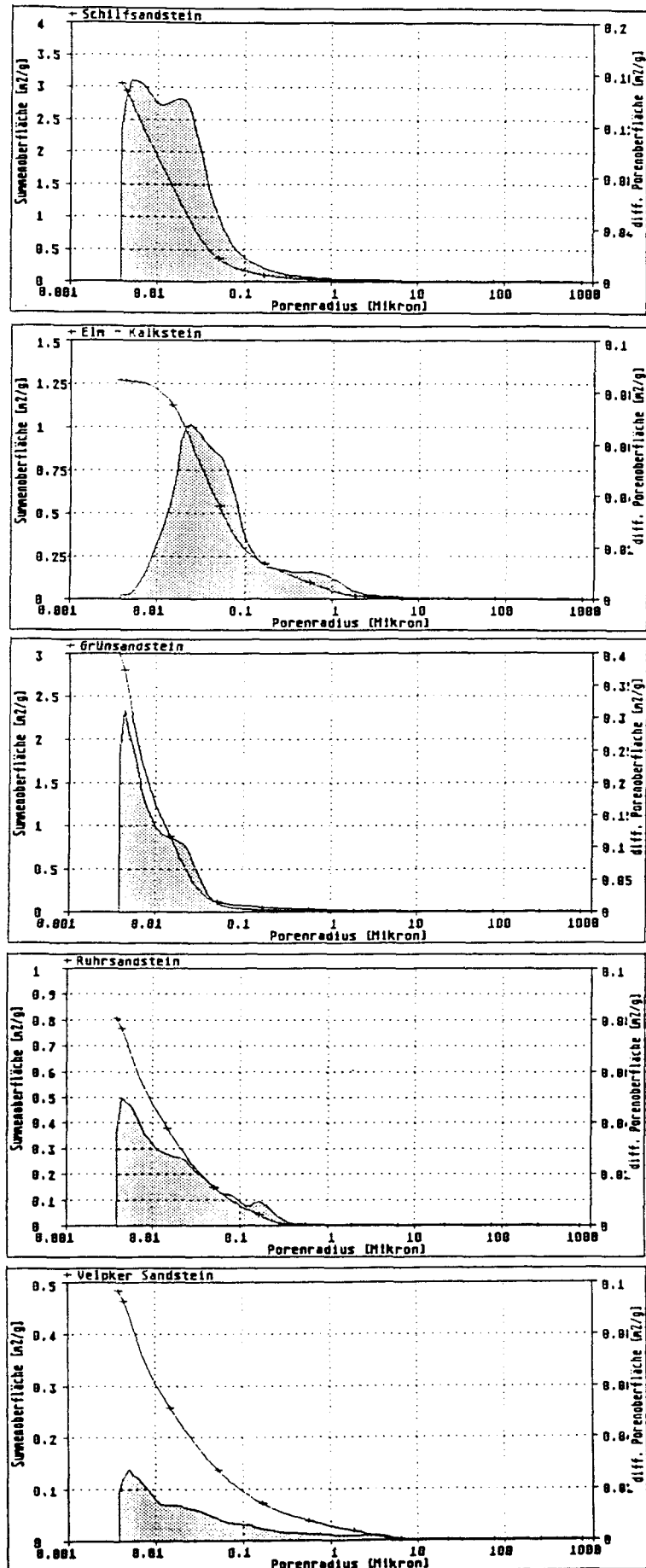
* berechnet aus Roh- und Reindichte

- Anlage 41 -

Ergänzende Porositätsmessungen verwendeter Natursteine

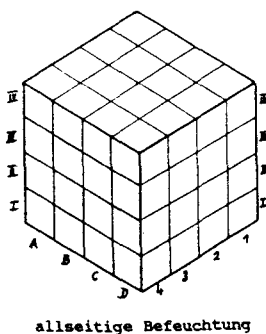
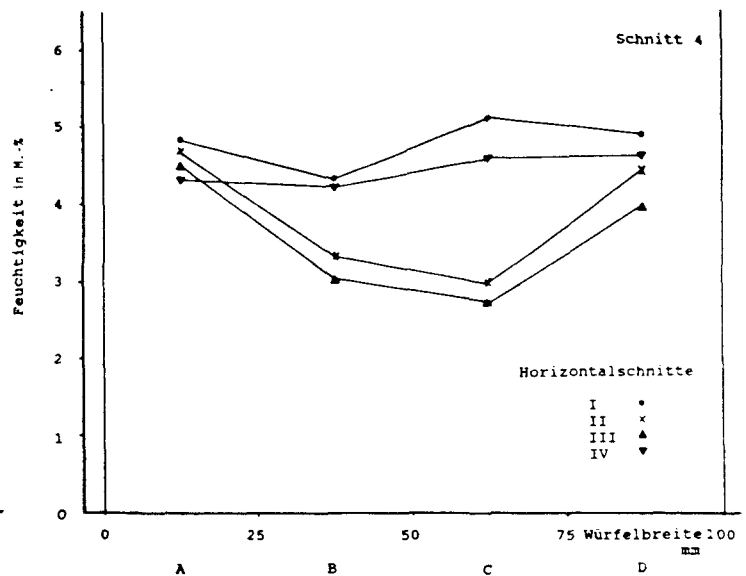
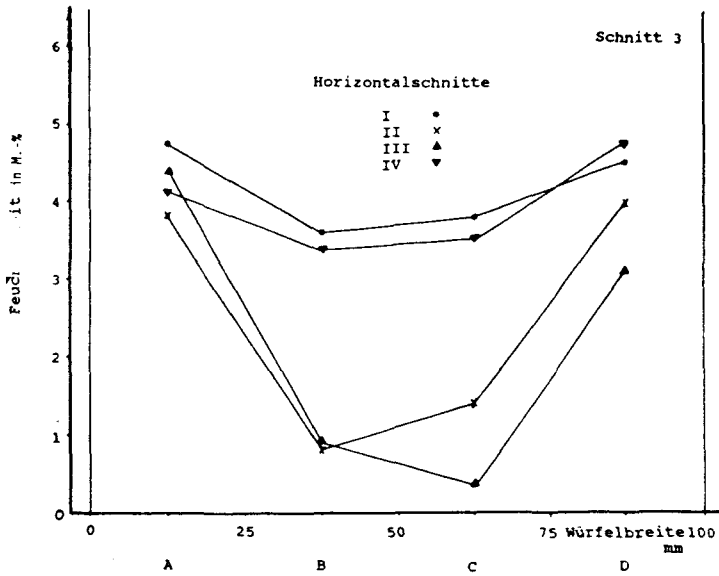
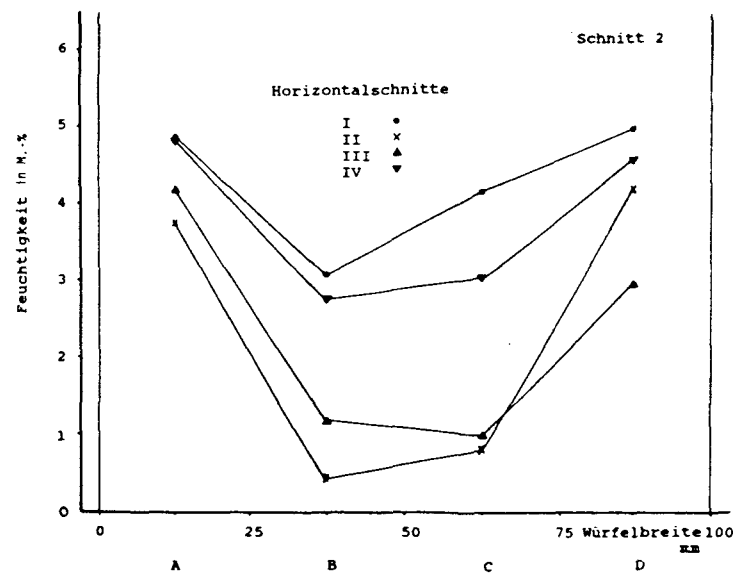
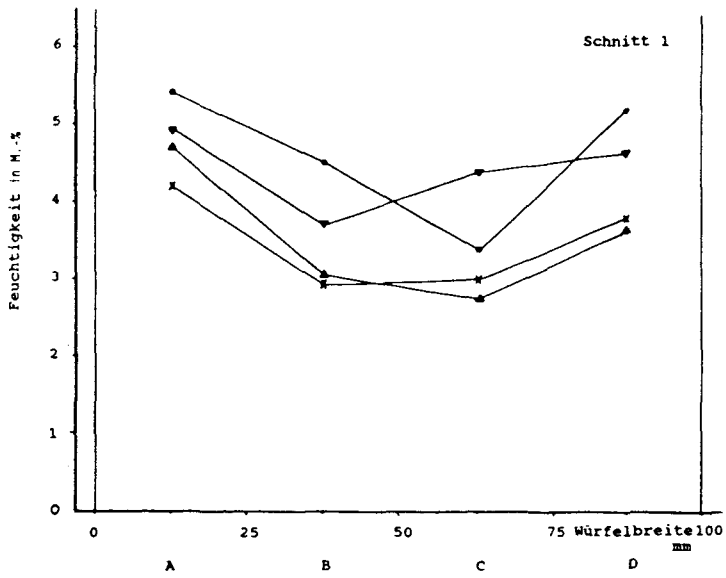
Natursteinart	Rohdichte	Reindichte	Porosität				Summe spezifischer innerer Poren- oberfläche	Summe des spezifischen Porenvolumens	Porenvolumenverteilung Maxima bei Radius		Porenradienverteilung mittl. Porenradius			Oberfläche des Porenvolumens
			Gesamt	$r < 0,1 \mu\text{m}$	$r = 0,1 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$	$r > 1 \mu\text{m}$			1	2	Gesamt	$0,1 \dots 1 \mu\text{m}$	$> 1 \mu\text{m}$	
-	kg/dm ³	kg/dm ³	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%	m ² /g	mm ³ /g	μm	μm	μm	μm	μm	m ² /cm ³
Sander Schilfsandstein	2,18 2,00	2,64 -	17,1 15,6	5,4	3,6	6,6	3,14 3,05	78,2	0,03	3,0	0,4	0,3	3,8	39,0
Elmkalkstein	1,93 2,04	2,71 -	24,7 24,2	3,3	8,4	12,5	1,28 1,27	120,9	1,1	6,1	0,9	0,4	3,7	10,5
Rüthener Grünsandstein	2,04 2,11	2,74 -	23,3 23,3	3,3	1,5	18,5	3,19 3,03	110,9	2,1	16,3	4,2	0,4	13,3	27,3
Herdecker Ruhrsandstein	2,52 2,56	2,67 -	4,1 4,1	1,8	1,8	0,5	0,84 0,80	16,0	0,1	0,2	0,10	0,2	9,6	50,0
Velpker Sandstein	- 2,30	2,64 -	13,2 13,3	0,9	2,7	9,7	0,51 0,48	57,8	-	3,4	1,7	0,4	3,6	8,3

r = Porenradius



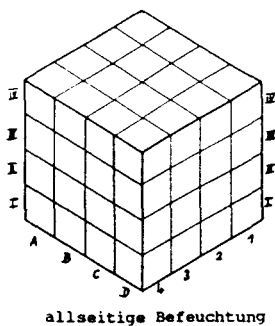
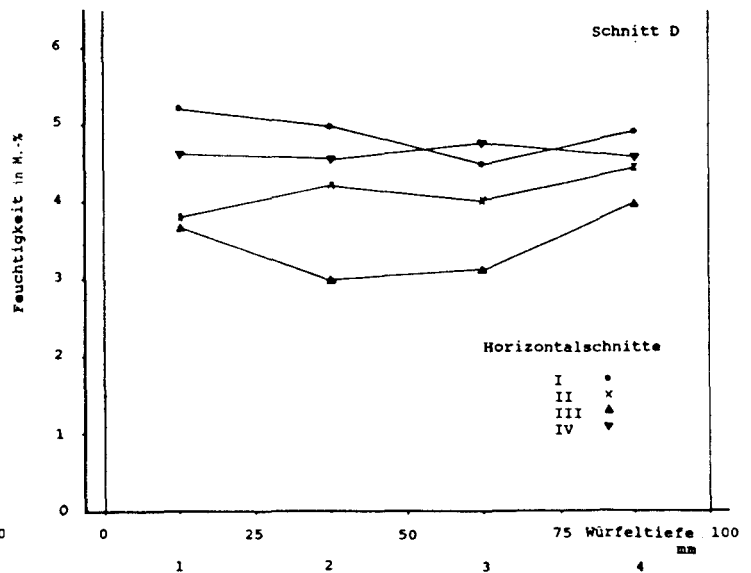
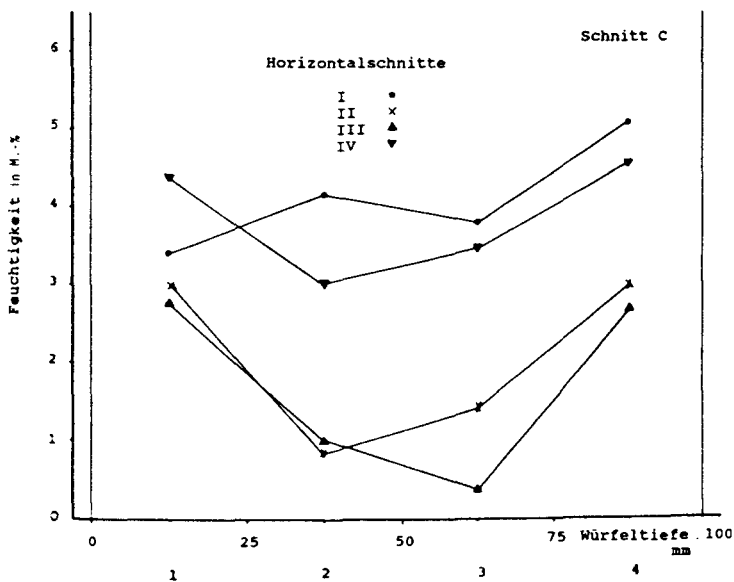
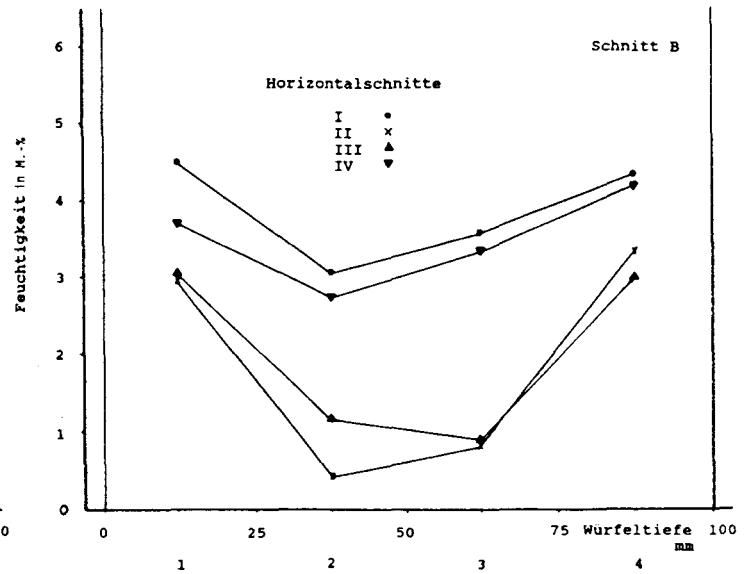
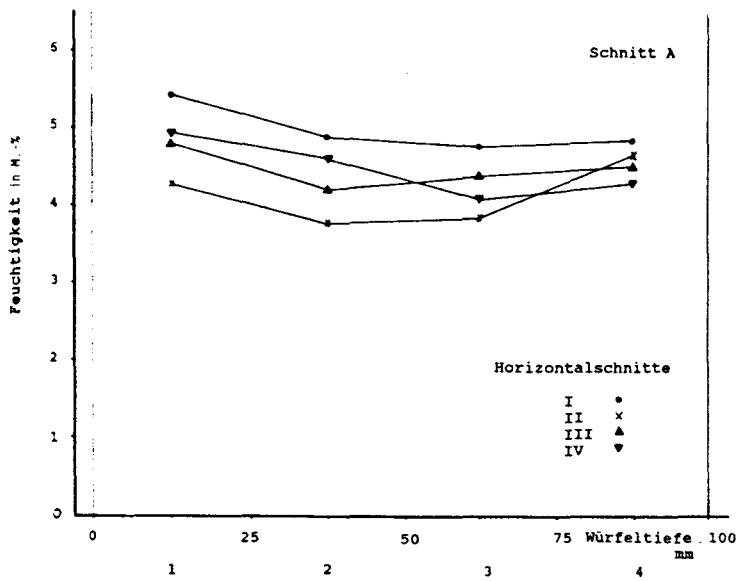
Porenoberflächen-Summenkurve und Porenoberflächenverteilung
über die Porenradien folgender Natursteine: Sander Schilfsandstein,
Elmkalkstein, Rütthener Grünsandstein, Herdecker Ruhrsandstein und
Velpker Sandstein

(Hinweis: unterschiedlicher Ordinatenmaßstab)



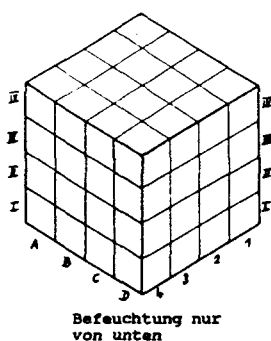
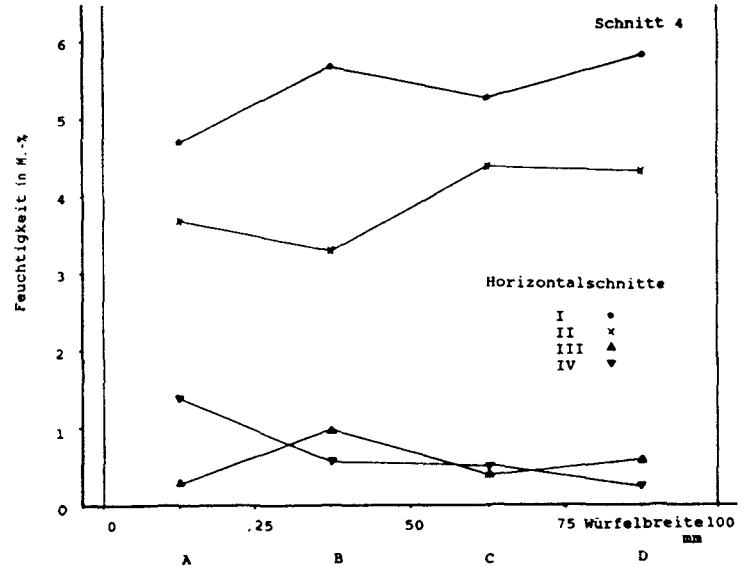
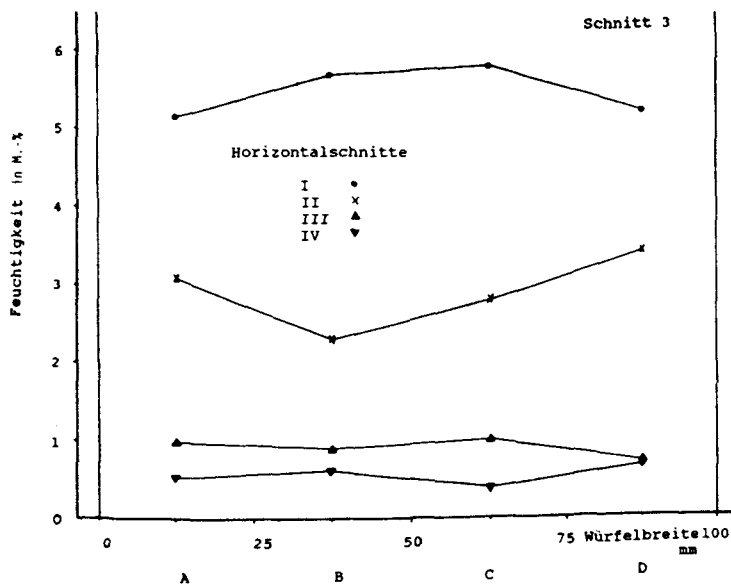
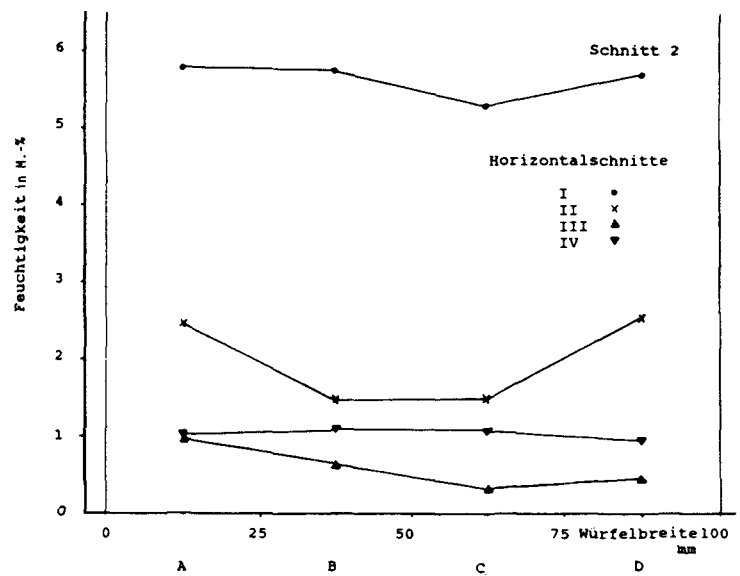
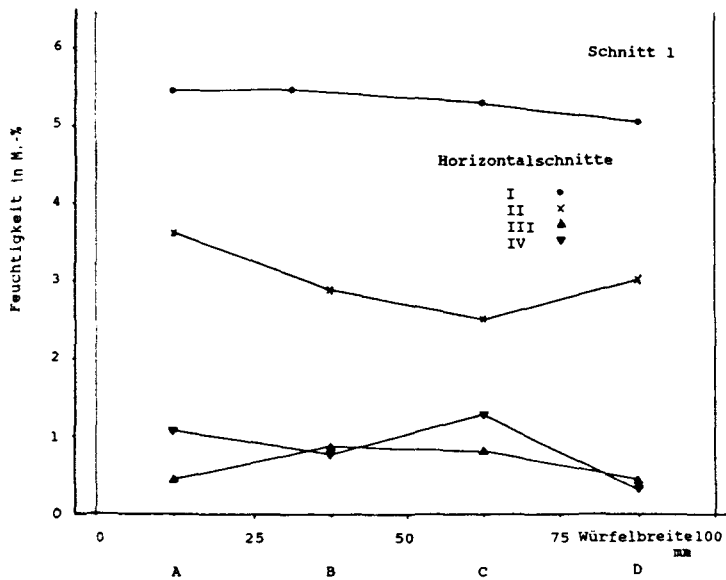
Feuchtigkeitsverteilung in einem in Wasser getauchten Würfel aus Sander Schilfsandstein über die Vertikalschnitte A bis D der Würfelbreite für die dazu senkrechten Horizontalschnitte 1 bis 4 und die Horizontalschnitte I bis IV

Befeuchtungsdauer: 1 Stunde



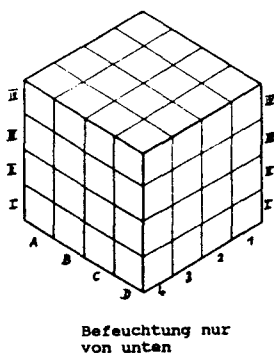
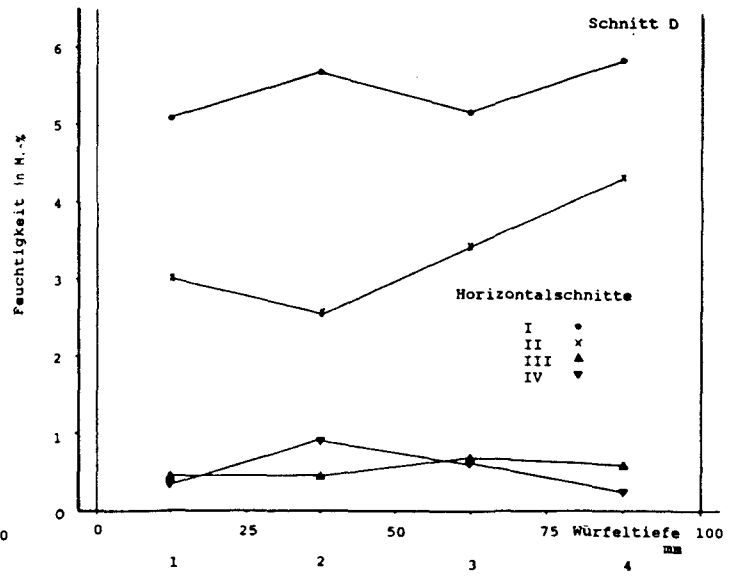
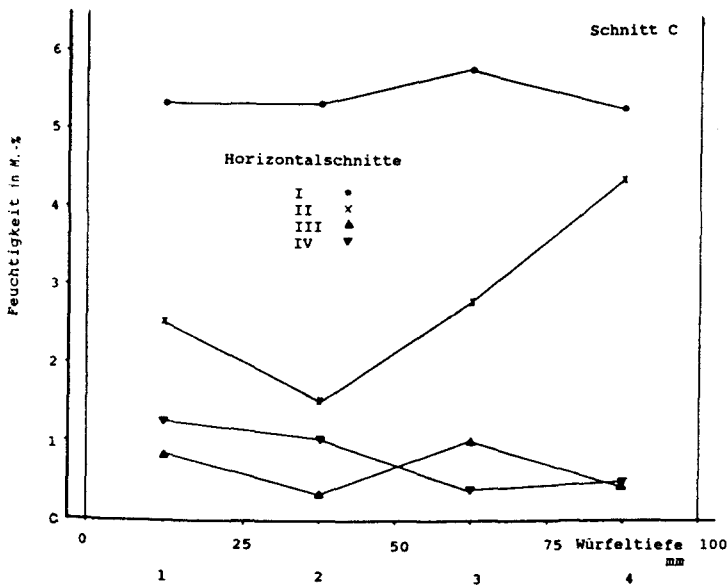
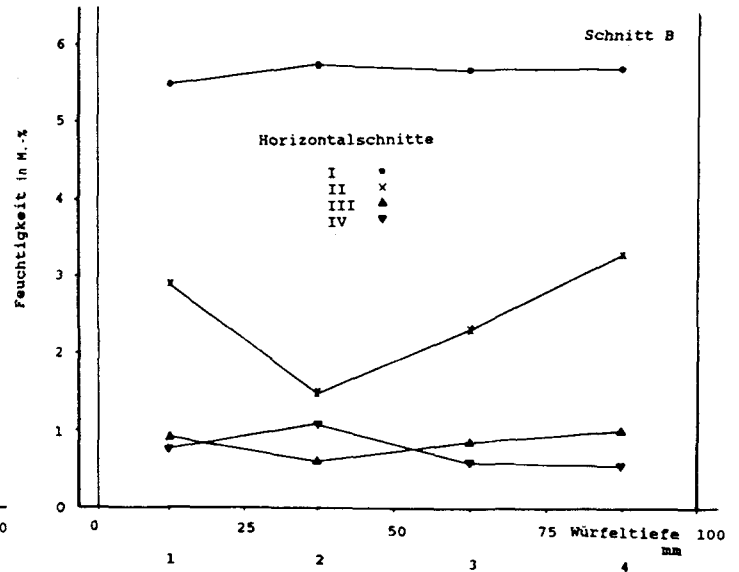
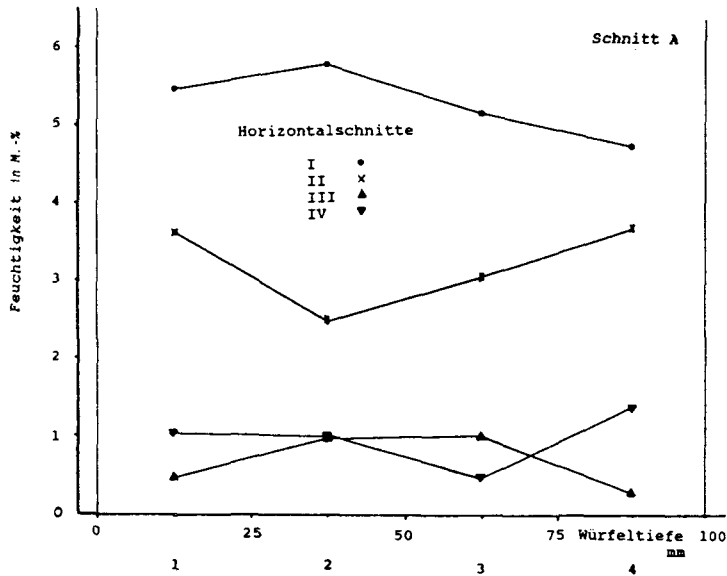
Feuchtigkeitsverteilung in einem in Wasser getauchten Würfel aus Sander Schilfsandstein über die Vertikalschnitte 1 bis 4 der Würfeltiefe für die dazu senkrechten Vertikalschnitte A bis D und die Horizontalschnitte I bis IV

Befeuchtungsdauer: 1 Stunde



Feuchtigkeitsverteilung in einem mit Wasser kapillar befeuchteten Würfel aus Sander Schilfsandstein über die Vertikalschnitte A bis D der Würfelbreite für die dazu senkrechten Vertikalschnitte 1 bis 4 und die Horizontalschnitte I bis IV

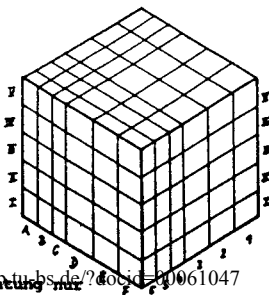
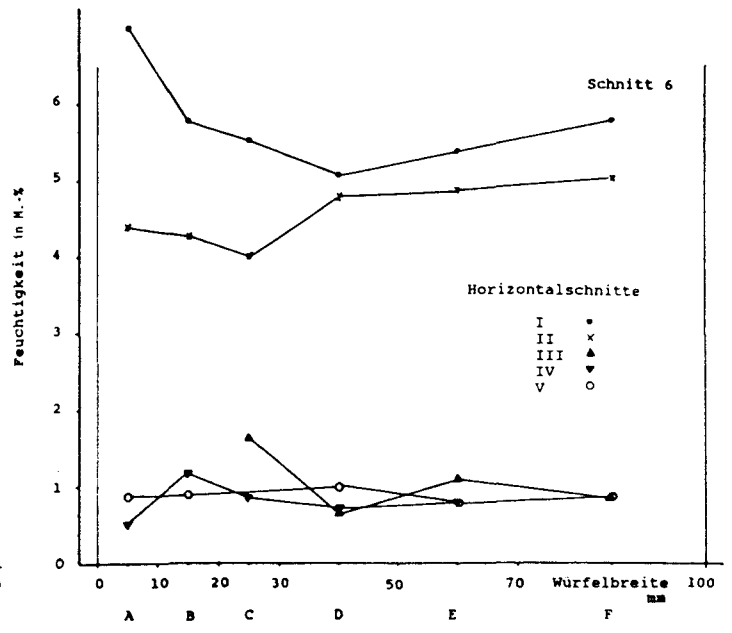
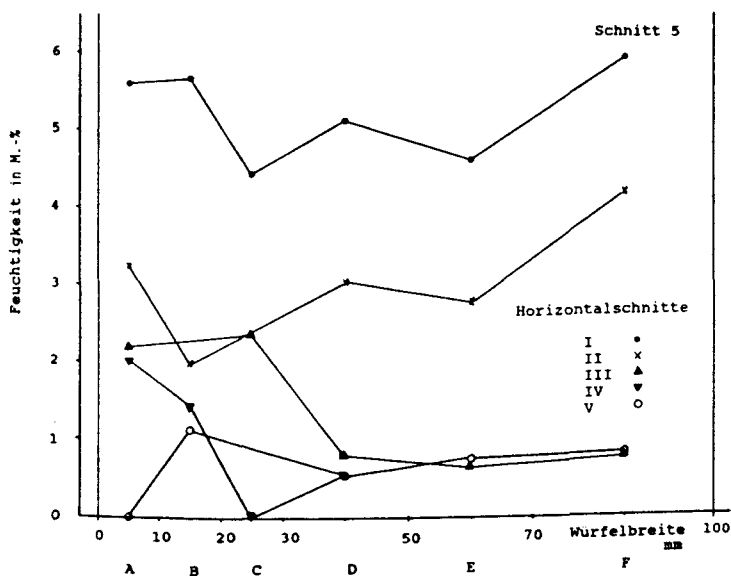
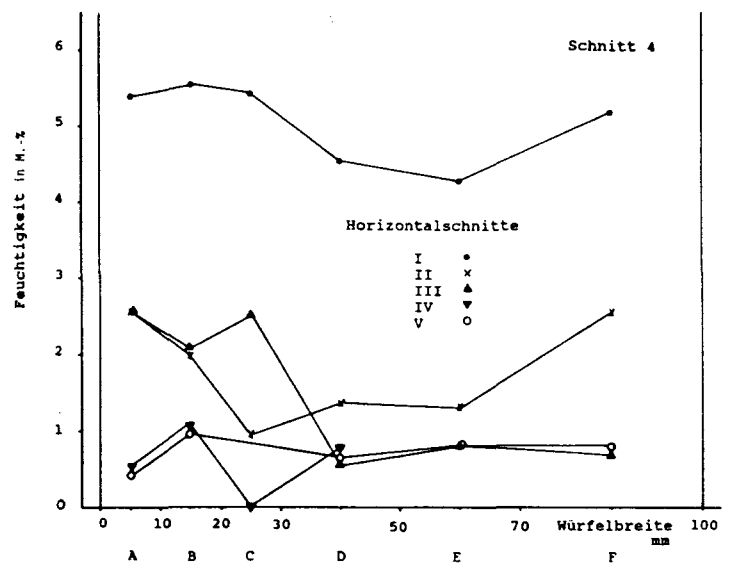
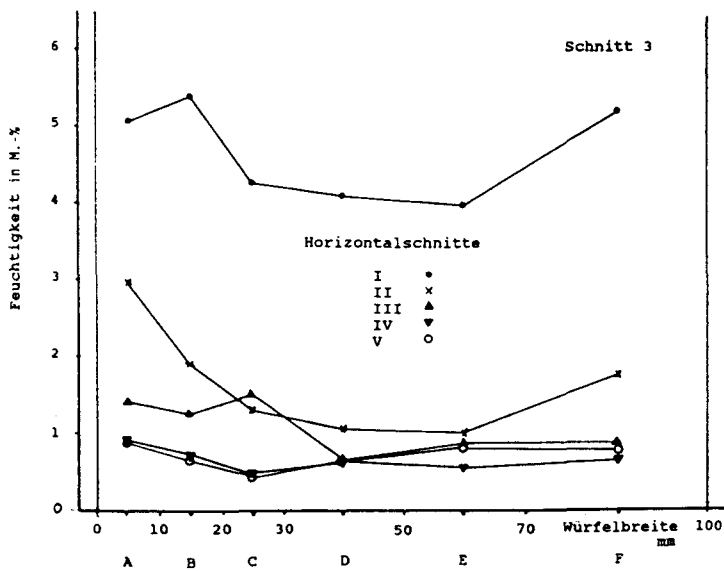
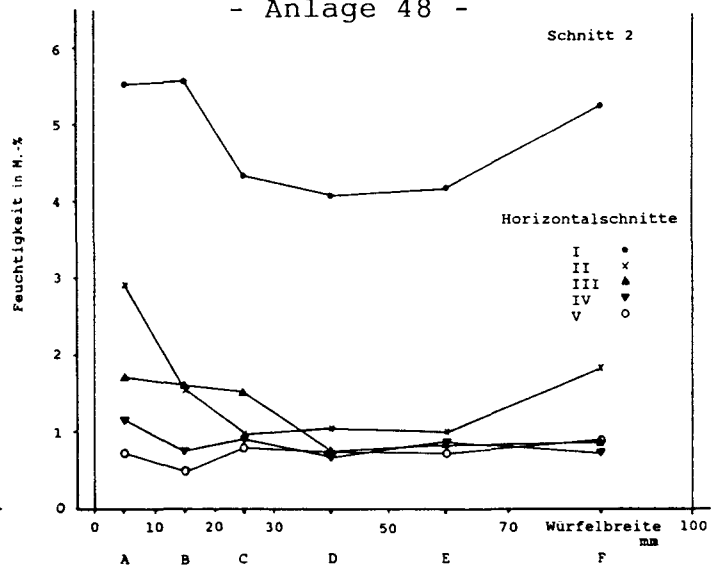
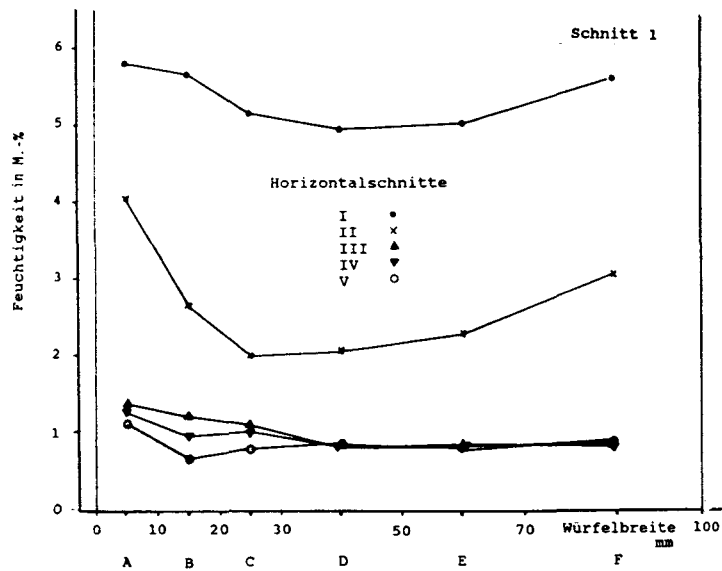
Befeuchtungsdauer: 1 Stunde



Feuchtigkeitsverteilung in einem mit Wasser kapillar befeuchteten Würfel aus Sander Schilfsandstein über die Vertikalschnitte 1 bis 4 der Würfeltiefe für die dazu senkrechten Vertikalschnitte A bis D und die Horizontalschnitte I bis IV

Befeuchtungsdauer: 1 Stunde

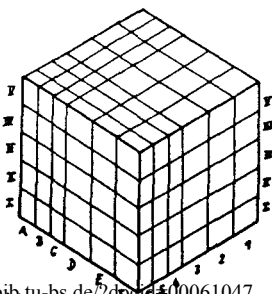
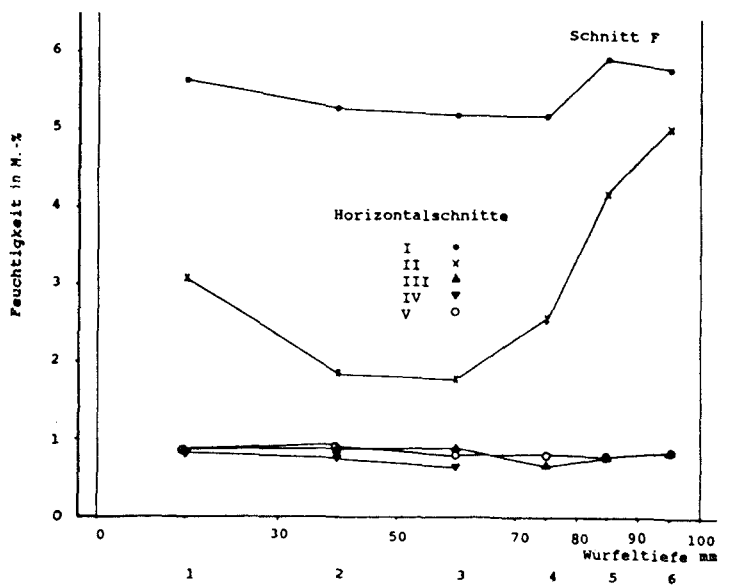
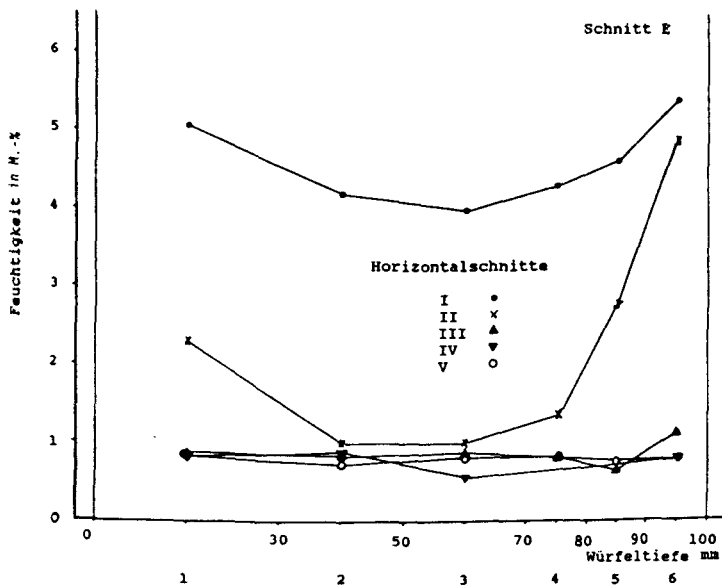
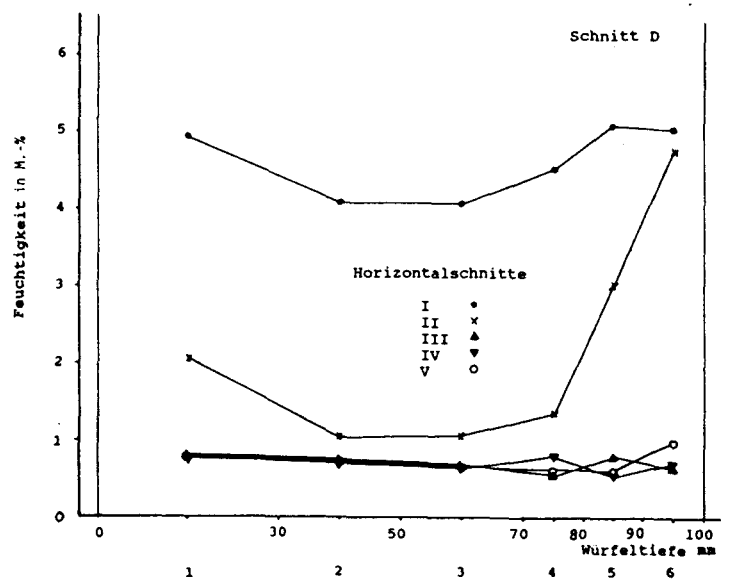
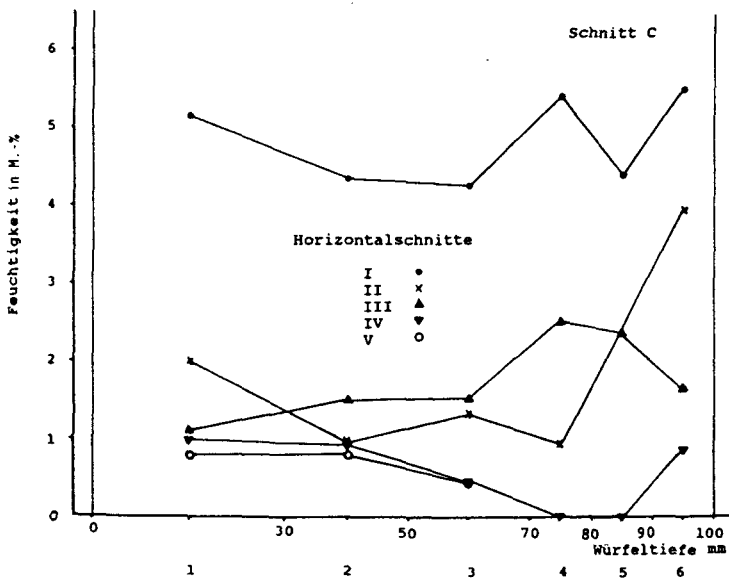
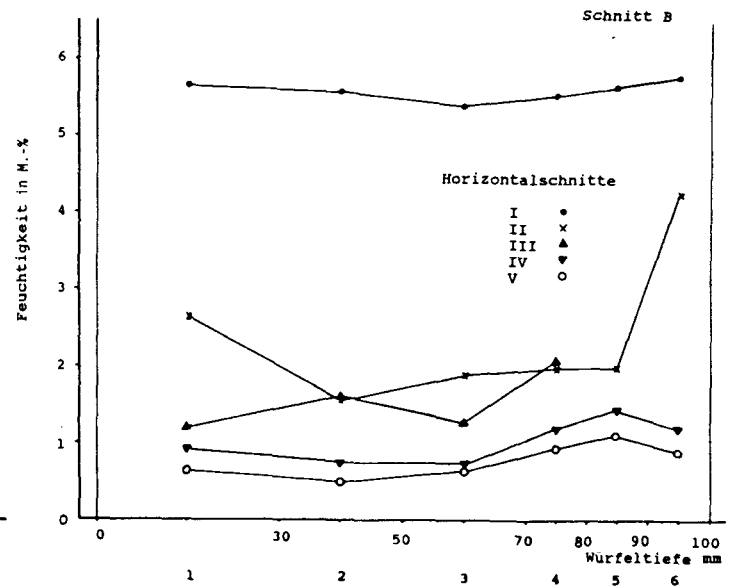
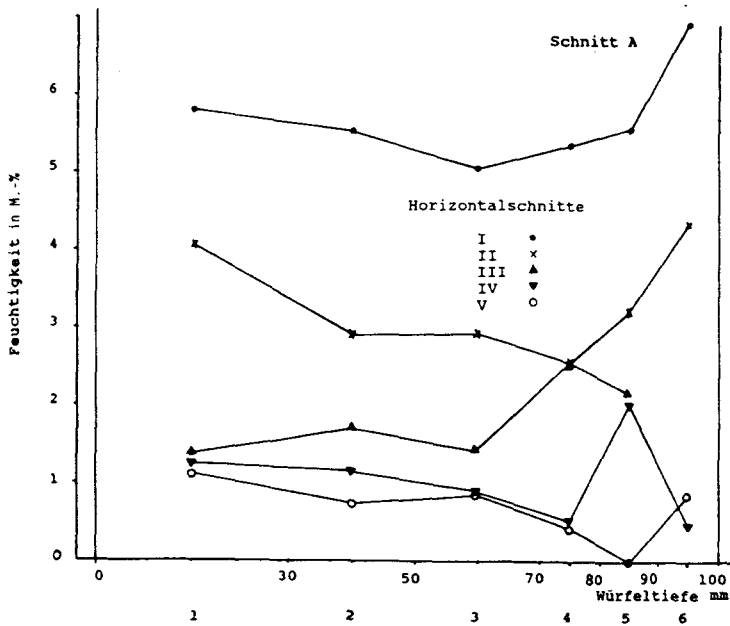
- Anlage 48 -



Feuchtigkeitsverteilung in einem mit Wasser kapillar befeuchteten Würfel aus Sander Schilfsandstein über die Vertikalschnitte A bis F der Würfelbreite für die dazu senkrechten Vertikalschnitte 1 bis 6 und die Horizontalschnitte I bis V

Befeuchtungsdauer: 1 Stunde

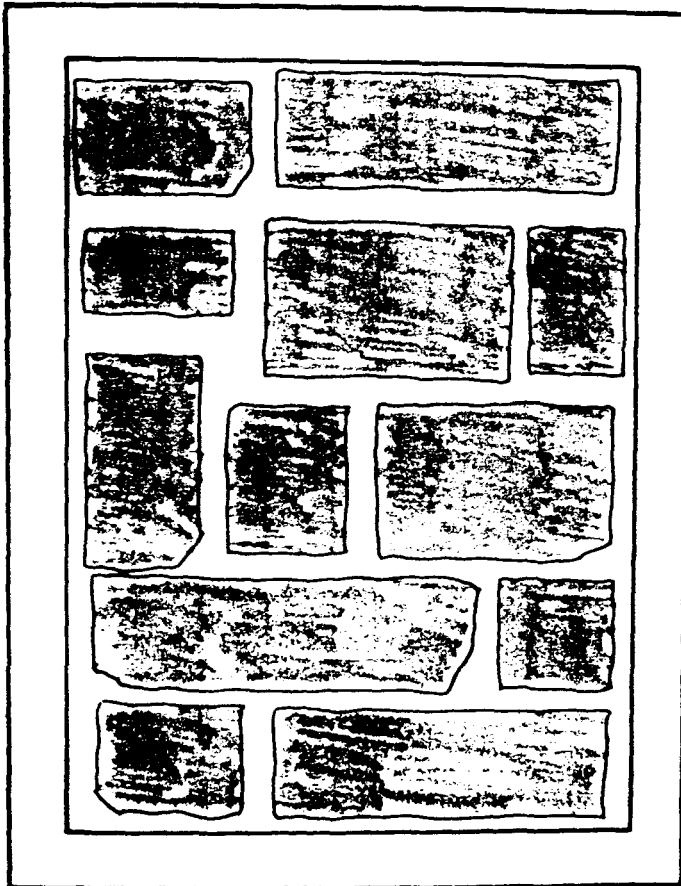
- Anlage 49 -



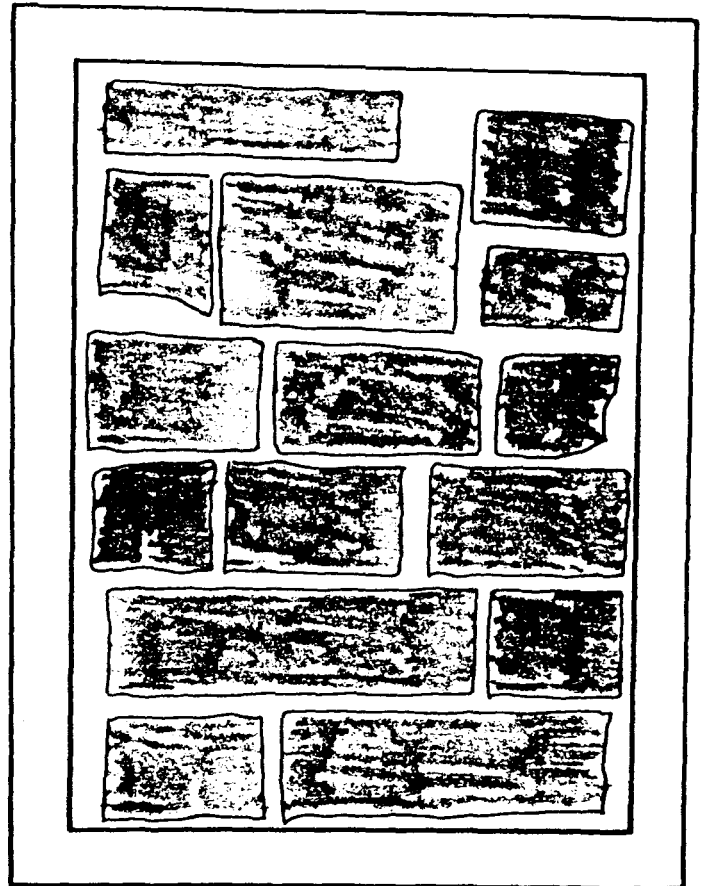
Feuchtigkeitsverteilung in einem mit Wasser kapillar befeuchteten Würfel aus Sander Schilfsandstein über die Vertikalschnitte 1 bis 6 der Würfeltiefe für die dazu senkrechten Vertikalschnitte A bis F und die Horizontalschnitte I bis V

Befeuchtungsdauer: 1 Stunde 25/08/2015

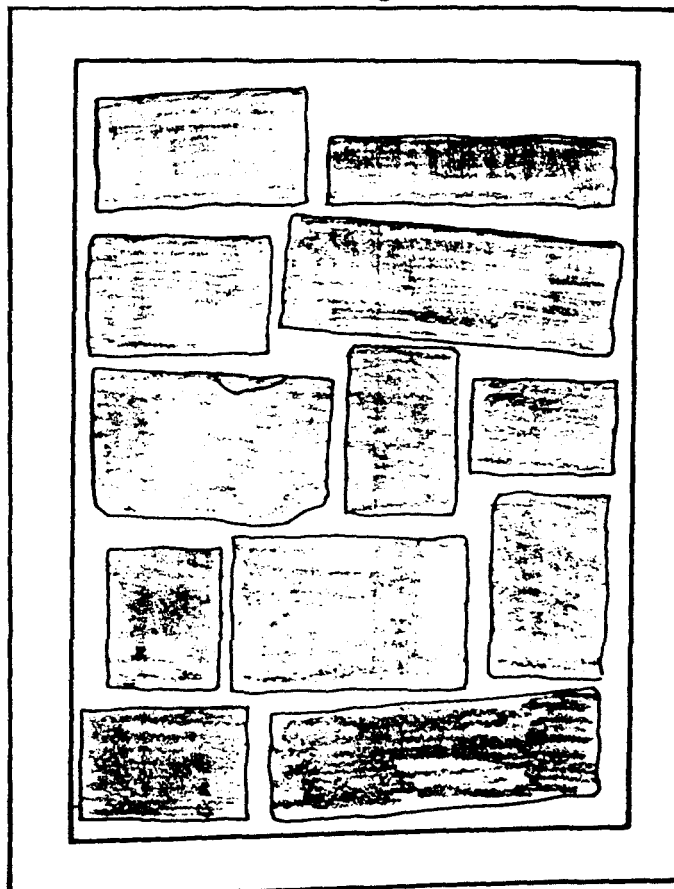
Nr. 1: später teilweise mit HGZ-Faserstopfmörtel verfugt



Nr. 2: später mit HGZ-Faserstopfmörtel verschiedener Rezepturen verfugt

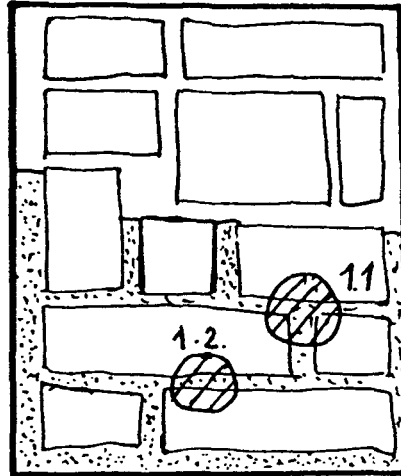


Nr. 4: später teilweise mit Zentrival FM 20 -Mörtel im Trockenspritzverfahren verfugt



Entnahmestellen der Bohrkern aus den Mauerwerksversuchswänden 1, 2 und 4

Mauerwerks-Versuchswand Nr. 1:

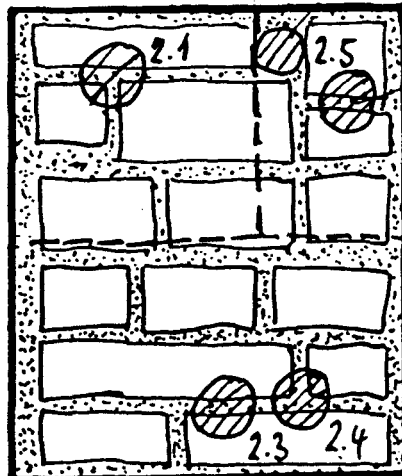


noch nicht verfügt

HGZ-Fasermörtel (HSD/AH/PZ = 78/15/7)
maschinell gemischt,
 $x_F = 0,05$; $x_S = 0,5$ (MS 0/2a), $w = 0,5$
Fugenschluß: 11.10.1989

Mauerwerks-Versuchswand Nr. 2:

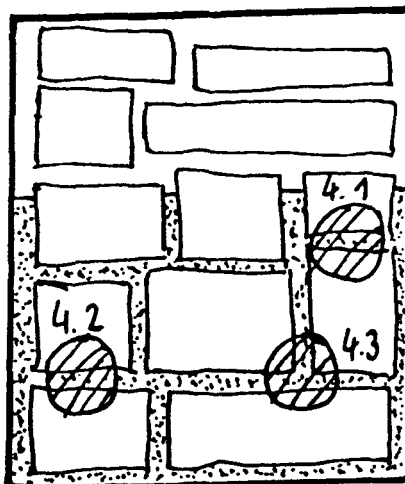
HGZ-Fasermörtel
 $x_F = 0,05$; $x_S = 0,5$ (NS 0,5/1)
 $w = 0,5$
Handstreuverfahren
Fugenschluß: 21.4.1989



HGZ-Fasermörtel (HSD/AH/PZ = 78/15/7)
Handstreuverfahren
 $x_F = 0,05$; $x_S = 0,5$ (NS 1/2); $w = 0,5$
Fugenschluß: 21.4.1989

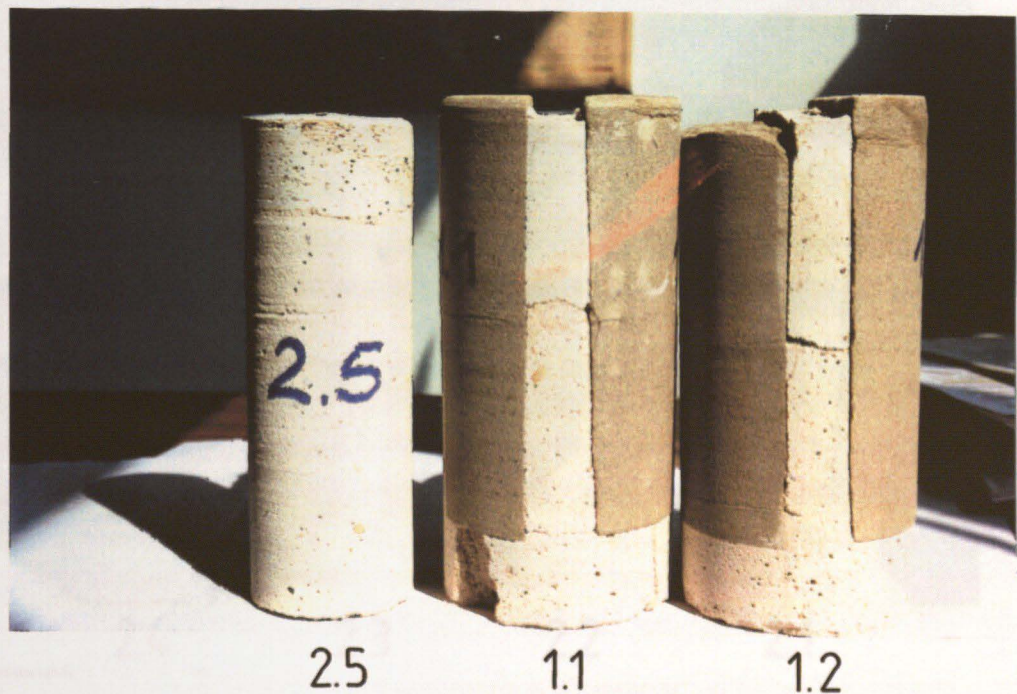
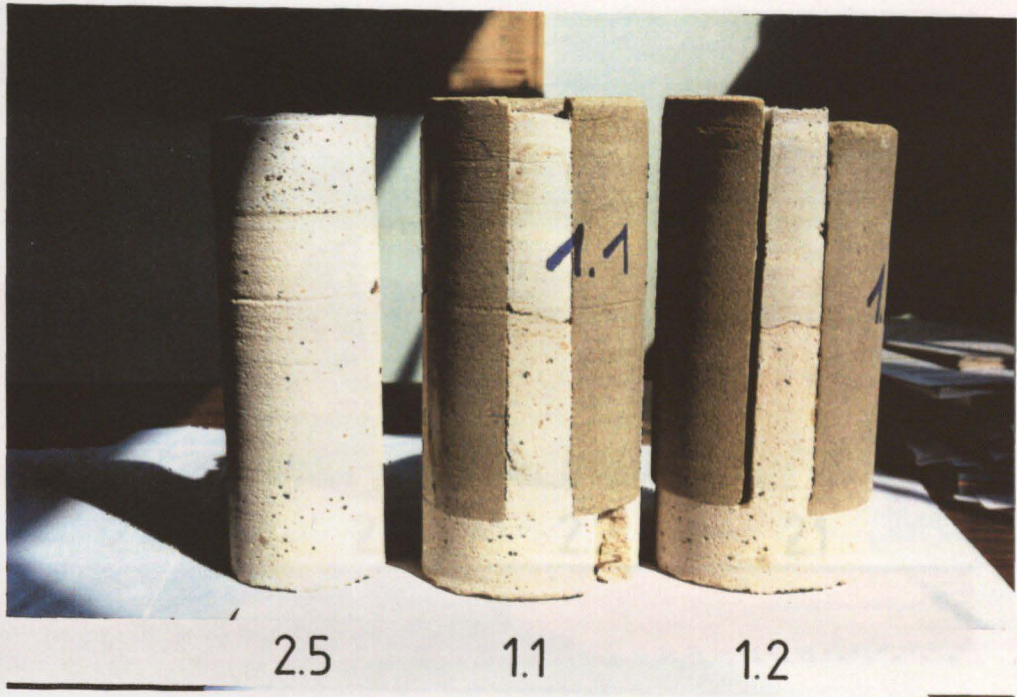
HGZ-Fasermörtel (HSD/AH-AB 20/PZ = 75/20/5)
Handstreuverfahren
 $x_F = 0,05$; $x_S = 0$, $w = 0,50$, $z = 0,0015$
Fugenschluß: 24.2.1989





Mauerwerks-Versuchswand Nr. 4:

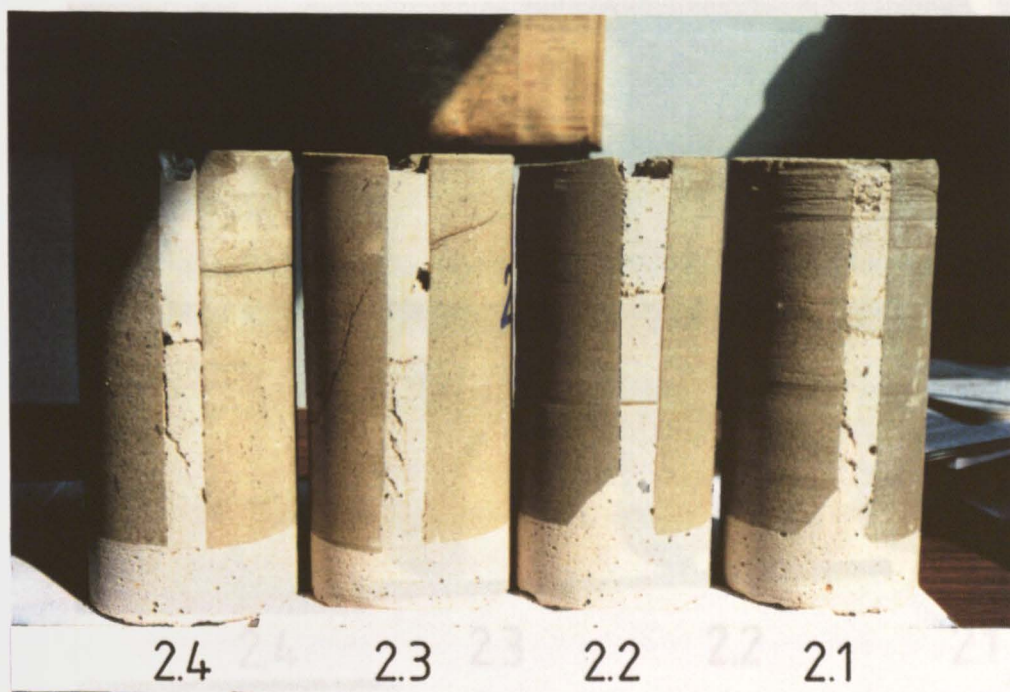


noch nicht verfügt

Zentrival-FM 20-Mörtel
Trockenspritzen
Fugenverschluß: 6.6.1990

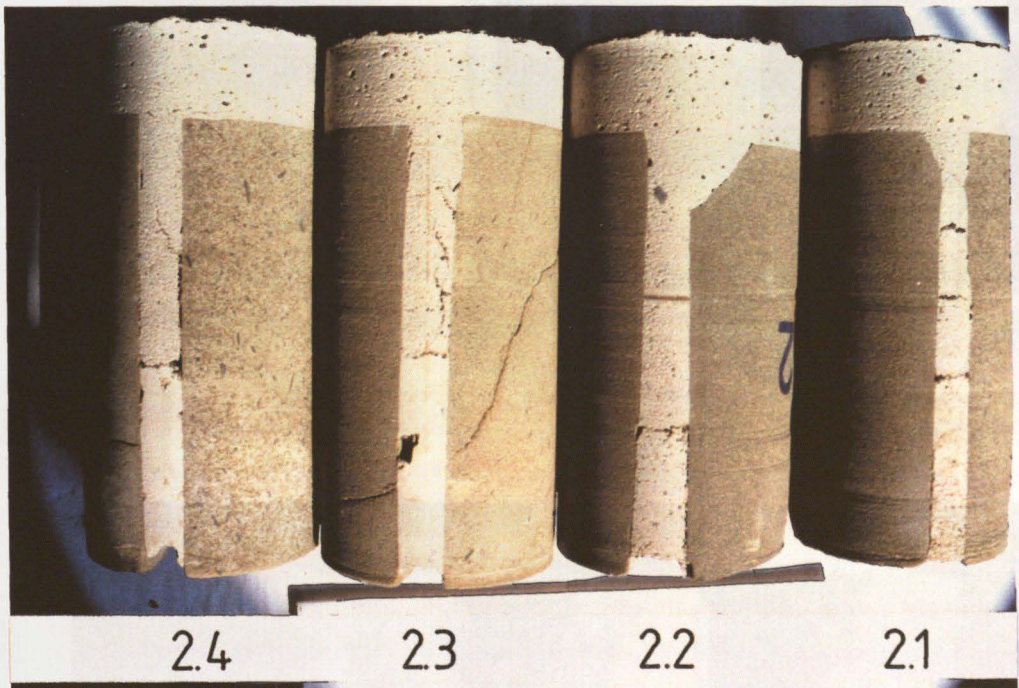
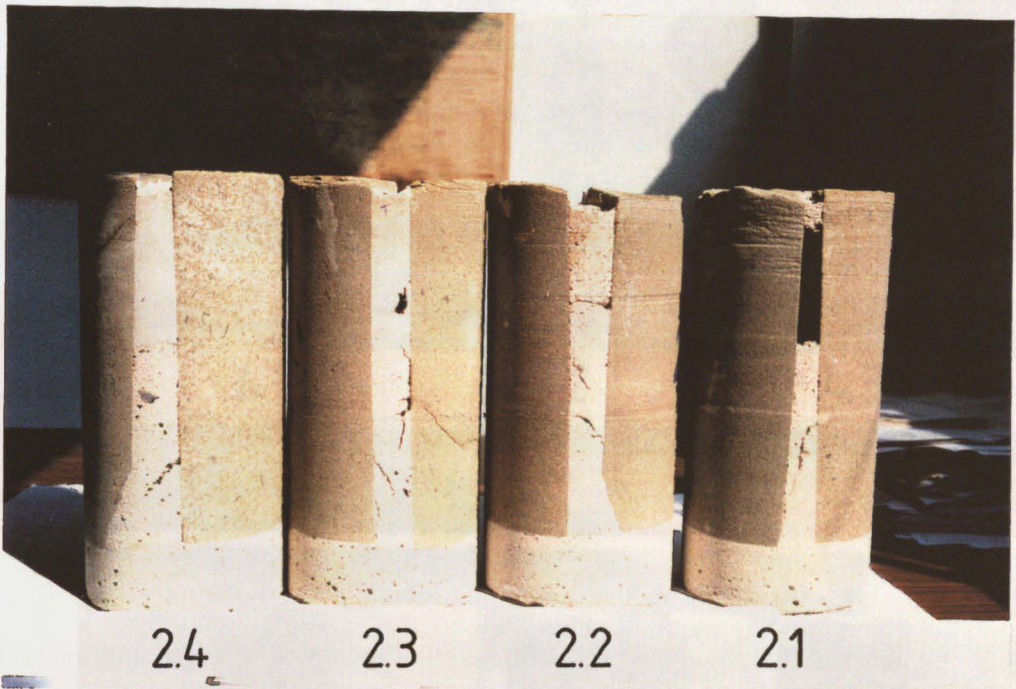


Bohrkerne Nr. 1.1 (), Nr. 1.2 () sowie Nr. 2.5 (Mörtelprobe):
HGZ-Fasermörtel (1.1; 1.2): HSD/AH/PZ = 78/15/7; mechanisch gemischt;
 $x_S = 0,5$; $x_F = 0,05$; $w = 0,50$ (MS 0/2 a, Grube Wedtlenstedt); Stein  1.1
und Stein  1.2 vom Grundmörtel und HGZ-Mörtel bei Bohrkernentnahme gelöst
(kein Anliegen des Grundmörtels!),
Kern 1.1: HGZ-Mörtel liegt an Flanken gut an



Bohrkerne Nr. 2.1 ($x_S = 0,5$; NS 0,5/1); Nr. 2.2 ($x_S = 0,5$; NS 1/2); Nr. 2.3 und Nr. 2.4 ($x_S = 0$):

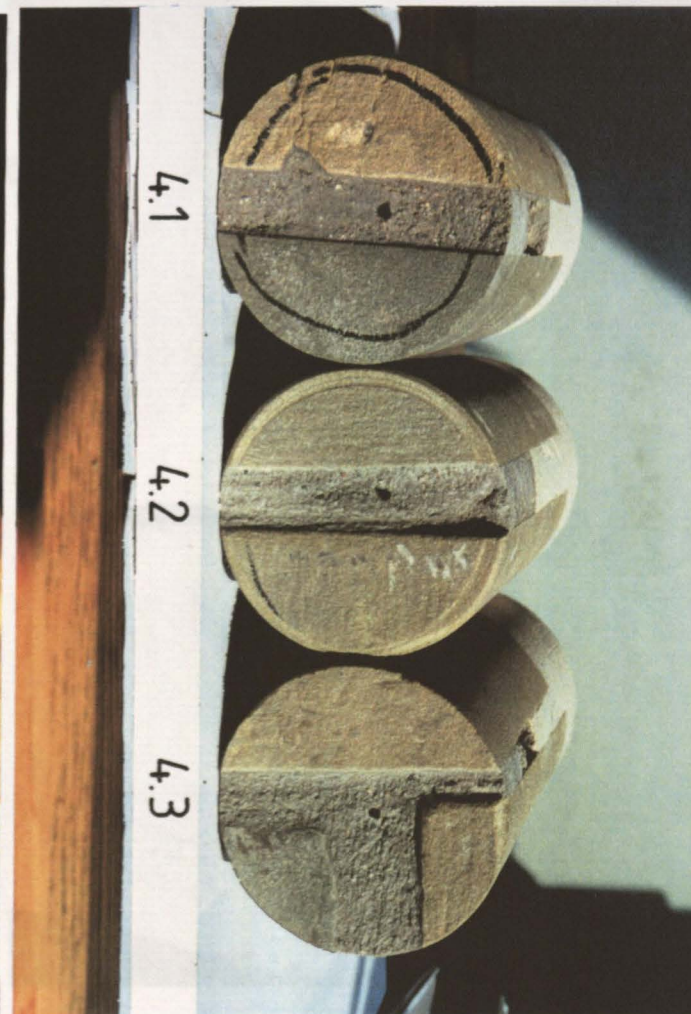
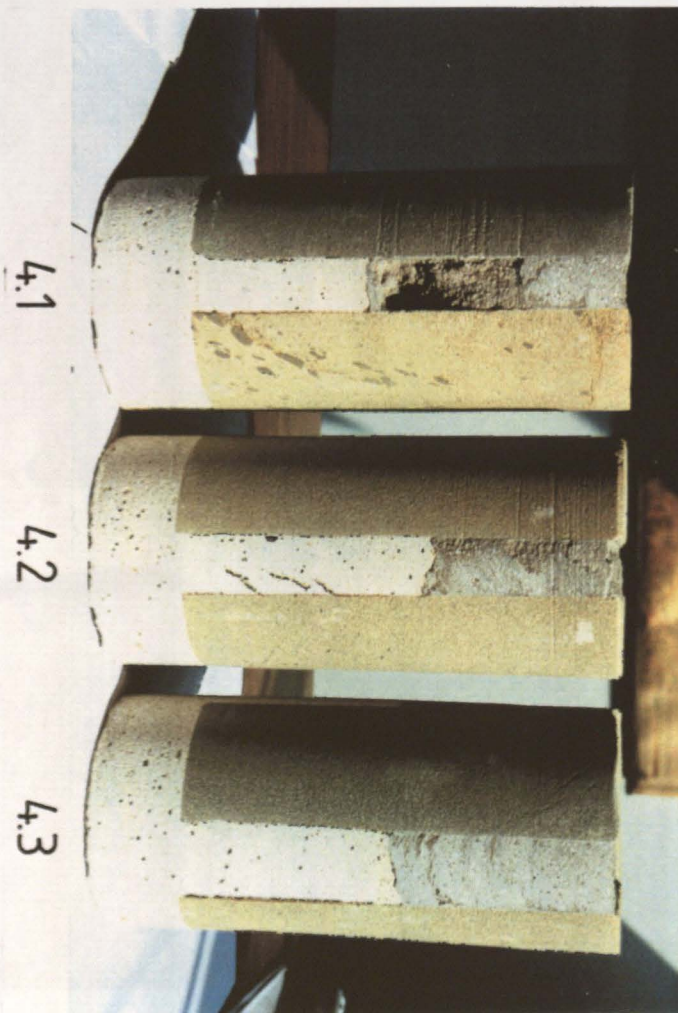
HGZ-Mörtel: HSD/AH/PZ = 78 (75)/15 (20)/7 (5); $x_F = 0,05$; $w = 0,50$; Mörtel nach Handstreuverfahren hergestellt: ungemagerter HGZ-Mörtel liegt dicht am Stein an; gemagerter HGZ-Mörtel dagegen nicht so innig; dünne Fuge nicht ausreichend gefüllt! Risse und Lockerstellen im Grundmörtel



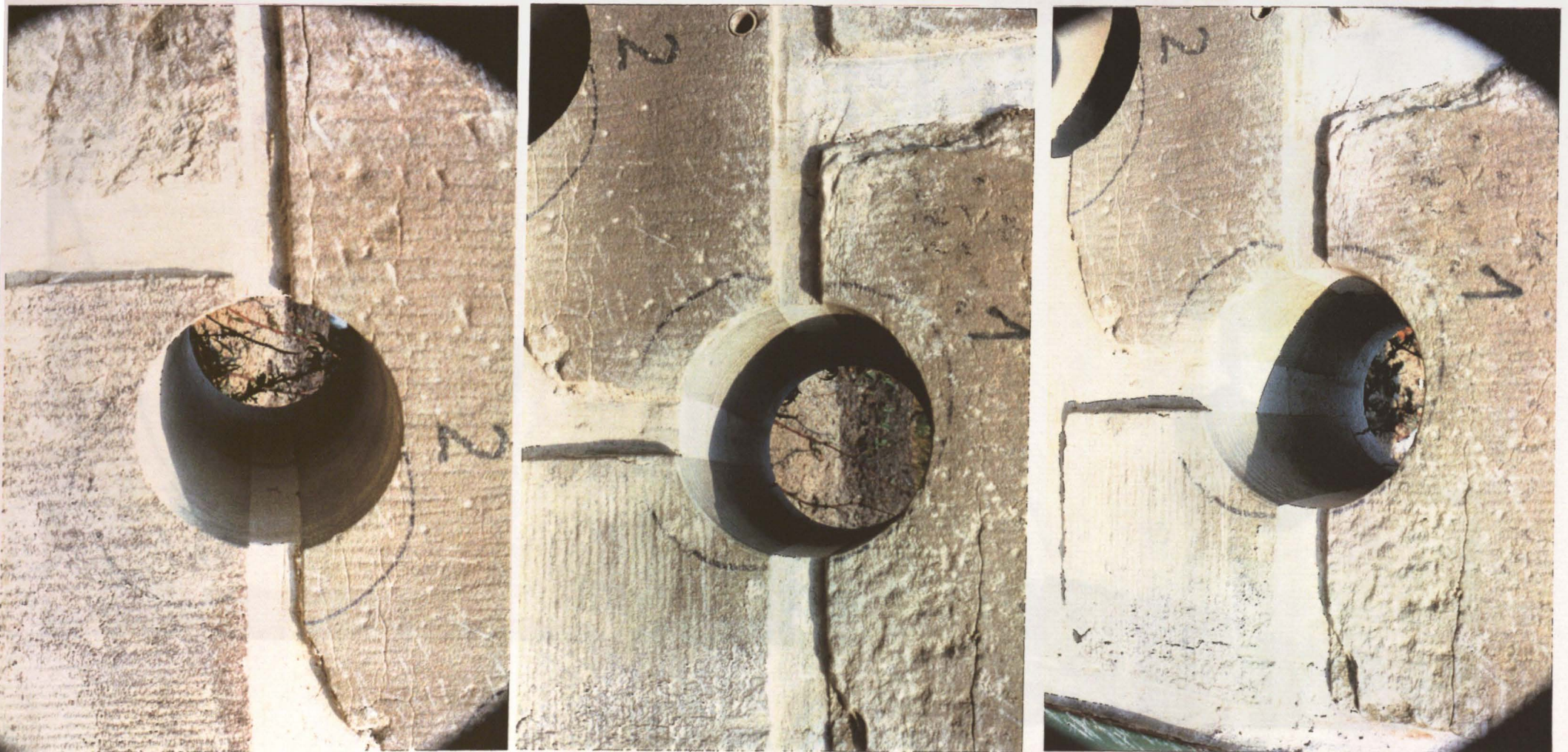
Bohrkerne Nr. 2.1 ($x_S = 0,5$; NS 0,5/1); Nr. 2.2 ($x_S = 0,5$; NS 1/2); Nr. 2.3 und Nr. 2.4 ($x_S = 0$):

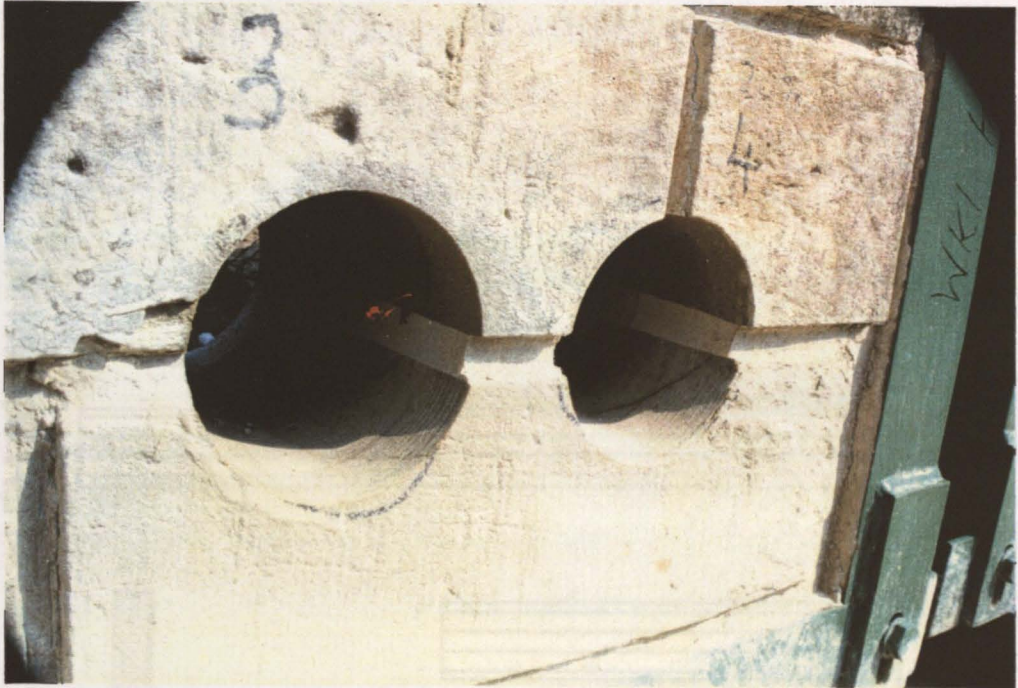
HGZ-Mörtel: HSD/AH/PZ = 78 (75)/15 (20)/7 (5); $x_F = 0,05$; $w = 0,50$; Mörtel nach Handstreuverfahren hergestellt: ungemagerter HGZ-Mörtel liegt dicht am Stein an; gemagerter HGZ-Mörtel dagegen nicht so innig; dünne Fuge nicht ausreichend gefüllt! Risse und Lockerstellen im Grundmörtel

Bohrkerne Nr. 4.1 ... 4.3: Zentrival FM 20-Spritzmörtel (Mörteleinbringung 6.6.90).
 Wegen Entmischungen oder Rückprall keine geschlossenen Flanken bzw. geschlossene Fugen;
 Fugenausfüllung insgesamt ungünstiger als mit HGZ-Mörtel



Blick in die Bohrungen nach Entnahme der Bohrkerne Nr. 1.2 und Nr. 1.1; HGZ-Mörtel:
HSD/AH/PZ = 78/15/7; mechanisch gemischt; $x_S = 0,5$; $x_F = 0,05$; $W = 0,50$;
MS 0/2 a (Grube Wedtlenstedt), Mörtelzubereitung: 11.10.1989; HGZ-Mörtel
liegt voll an Flanken an, dagegen Flankenablösung des Grundmörtels





Blick in die Bohrungen nach Entnahme der Bohrkerne Nr. 2.3 und Nr. 2.4:

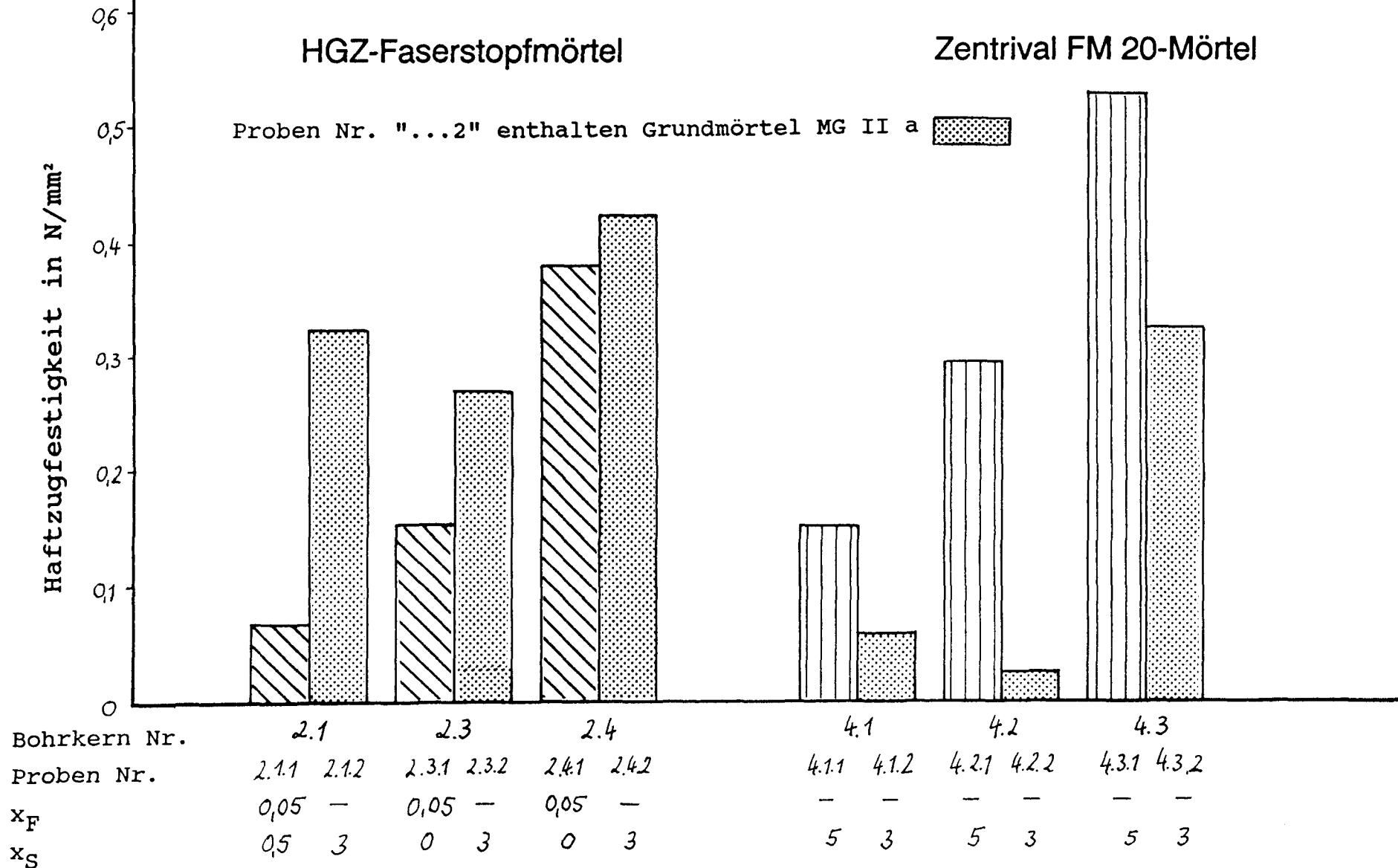
HGZ-Mörtel: $x_S = 0$; $x_F = 0,05$; $w = 0,50$; $z = 0,0015$; HSD/AH-AB 20/PZ 45 F = 75/20/5

Mörteleinbringung: 24.2.1989, Mörtelherstellung im Handstreuverfahren;

HGZ-Mörtel liegt bündig am Naturstein; bei Grundmörtel Risse, tlw. Flankenablösung



Haftzugfestigkeit zwischen Mörtel und Sander Schilfsandstein, bestimmt an den Bohrkernen der Mauerwerks-Versuchswände 2 und 4



Haftzugfestigkeit von Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel sowie Festmörtel Eigenschaften (gestopft mit Druckluftstamper)

Versuchs-Nr.		Mittlere Steinfeuchtigkeit nach Tauchen und Befeuchtungsdauer von			Haftzugfestigkeit β_{HZ} nach (n = 6)			Festmörtel									Feuchtigkeitsbilanz (geschätzt) Masseaufnahme bis Prüftermin					
								Prüffeuchte (n = 6)			Trockenrohdichte (n = 5)			Trockendruckfestigkeit (n = 5)			Sander Sandstein			Mörtel		
		u (n ≥ 12)	t		7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
-		M.-%	h		N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	M.-%	M.-%	M.-%	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	g	g	g	g	g	g
1.1 K 1/1 ... 6 02 K 1/1 ... 6 1)	\bar{x} V	2,7 11,6 %	0,9 9,8 %	1,0 Tauchen	0,03 26,7 %	0,31 30,8 %	0,22 58,8 %	-	12,1 3,2%	-	1,50 1,2 %	1,48 1,1 %	-	43,2 3,4 %	39,4 9,8 %	-	-	-	-	-	-	-
1.1 K 1/7 ... 12 1.1 K 1/13 ... 18 1) 3) 4)	\bar{x} V	2,8 11,8 %	1,0 Tauchen	I II 0,38 0,53 40,5 % 46,1 %	0,14 42,6	-	-	15,3 2,9%	-	1,47 1,1 %	1,43 0,7 %	-	33,1 9,6 %	33,7 6,4 %	-	-	-	-	-	-	-	-
02 K 1/7 ... 12 1.1 K 1/19 ... 24 1) 3) 4)	\bar{x} V	3,1 11,7 %	1,0 Tauchen	-	0,24 43,3 %	0,07 90,7 %	-	14,7 4,9 %	9,9 10,0 %	-	1,50 0,8 %	n.b.	-	42,7 7,2 %	n.b.	-	-	-	-	-	-	-
1.1 K 2/1 ... 6 1.1 K 2/7 ... 12 1.1 K 2/13 ... 18	\bar{x} V	2,7 13,7 %	1,0 Tauchen	0,24 103 %	0,42 80,2 %	0,20 144 %	20,4 9,8 %	18,7 5,4 %	19,9 6,8 %	1,46 1,1 %	1,50 1,5 %	n.b.	34,5 7,0 %	41,5 5,6 %	n.b.	-	-	-	-	-	-	-
02 K 1/19 ... 24 3) 4) 6)	\bar{x} V	2,9 15,5 %	1,0 Tauchen	-	0,11 37,6 %	-	-	18,0 12,7 %	-	-	1,47 1,0 %	-	-	42,8 4,9 %	-	-	-	-	-	-	-	-
1.1 K 1/25 ... 30 1.1 K 1/31 ... 36 3) 4) 6)	\bar{x} V	2,8 16,5 %	1,0 Tauchen	-	0,33 60,9 %	0,14 125 %	-	13,7 15,4 %	11,4 10,7 %	-	1,51 0,8 %	n.b.	-	43,3 12,3 %	n.b.	-	-	75,2 - 86,1	-	-	67,2 - 82,7	-
1.1 K 2/19 ... 24 1.1 K 2/25 ... 30 3) 4) 6) 7)	\bar{x} V	2,7 12,9 %	1,0 Tauchen	0,22 53,2 %	0,30 75,7 %	-	18,0 12,7 %	18,2 6,9 %	-	1,49 1,2 %	1,49 1,0 %	-	39,4 12,5 %	37,9 10,7 %	-	+ 43,0	+ 17,6	-	-	48,9 - 48,1	-	-
02 K 1/13 ... 18 1) 3) 4)	\bar{x} V	4,7 9,0 %	4,5 Tauchen	-	0,23 72,6 %	-	-	19,4 8,9 %	-	-	1,44 1,3 %	-	-	41,4 1,2 %	-	-	-	-	-	-	-	-
02 K 1/25 ... 30 3) 4) 6)	\bar{x} V	4,4 16,2 %	4,5 Tauchen	-	0,38 56,2 %	-	-	18,5 7,8 %	-	-	1,46 1,2 %	-	-	47,8 7,0 %	-	-	-	-	-	-	-	-

1) HGZ-BM: 85/10/5; 2) Form geschlossen mit Druckbalken bis Prüftag; 3) nach Stopfende Form entspannt und Druckbalken abgenommen
4) 20/65 5) 20/99 6) HGZ-BM: 78/15/7; 7) bis Prüfung in Folie 2 d in Form; 5 d unter Folie, dann im Klima 20/65 bzw. 20/99 offen;
I Werte Prüfung; II Bruchfläche geklebt und nach Klebererhärtung erneut bis Bruch belastet (Bruch an anderer Verbundfläche)

Oberflächen abgelöster Mörtelplatten aus Sander Schilfsandstein-Probekörpern nach Prüfung der Haftzugfestigkeit (Beispiele)

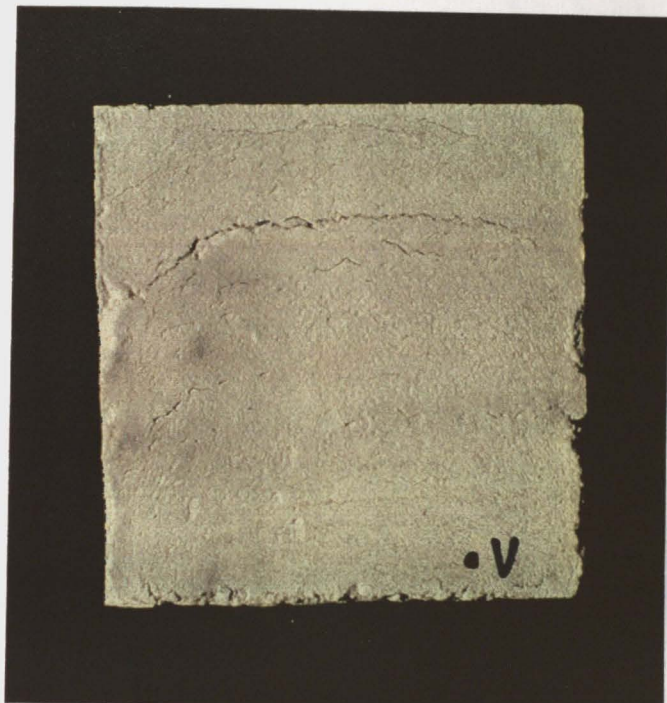


Bild 1: Probe 02C2K1/2;
HGZ-Faserstopfmörtel, mit Sander Schilfsandstein
verarbeitet; konkaver Bereich senkrecht und
parallel zur Stopfrichtung (Stopfende bei "•V")

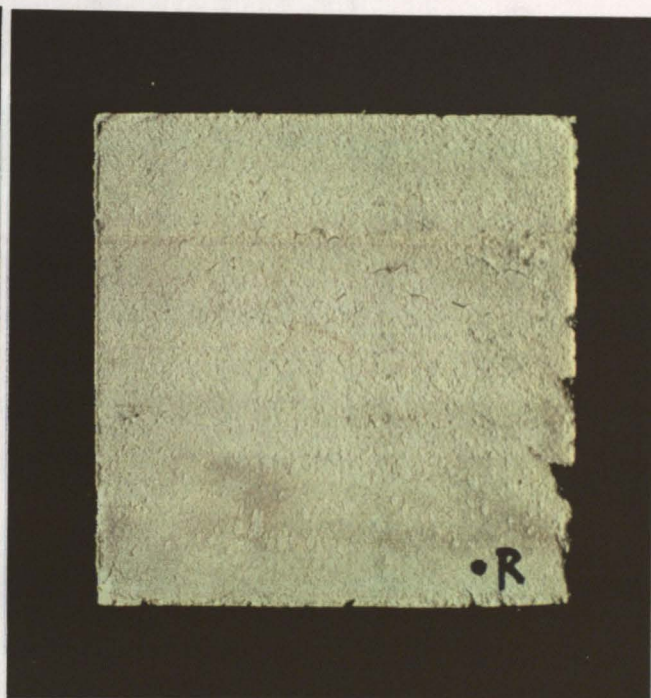


Bild 2: Probe 02C2K1/2;
Rückseite der Mörtelplatte von Bild 1:
senkrecht und parallel zur Stopfrichtung eben;



Bild 3: Probe 02C2K1/9;
HGZ-Faserstopfmörtel, mit Sander Schilfsandstein
verarbeitet, konkaver Bereich senkrecht und
parallel zur Stopfrichtung (Stopfende bei "xV")



Bild 4: Probe 02C2K1/9;
Rückseite der Mörtelplatte von Bild 3:
senkrecht und parallel zur Stopfrichtung eben;

Haftzugfestigkeit von Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel sowie Festmörteleigenschaften (gestopft noch teilweise mit Druckluftstamper und teilweise schon manuell)

Versuchs- Nr.		Mittlere Steinfeuchtigkeit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzugfestigkeit n. 28 d β_{HZ} (n = 6)	Festmörtel (n = 5 ... 6)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)	
		u (n = 12)	t		Prüffeuchte Mörtel	Trockenrohddichte	Trockendruckfestigkeit	Steine	Mörtel
-		M-%	h	N/mm ²	M-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
1.1 K 2/ 31...36 1)	\bar{x} V	1,9 14,0 %	4,5	7d: 0,38 17,3 %	16,9 7,5 %	1,54 0,8 %	41,0 5,3 %	+ 55,3	- 57,5
1.1 K 2/ 37...42 1)	\bar{x} V	4,5 16,2 %	27,0	7d: 0,52 68,9 %	23,9 6,7 %	1,47 0,9 %	41,6 5,3 %	- 4,7	+ 0,2
1.1 K 2/ 43...48 1) 2)	\bar{x} V	2,1 15,0 %	4,5	7d: 0,23 58,0 %	19,9 7,9 %	1,49 2,0 %	39,6 10,7 %	+ 40,1	- 41,9
05/1...6 3)	\bar{x} V	1,8 2,8 %	4,5	0,06 105 %	10,9 10,3 %	1,62 0,9 %	48,8 15,8 %	+ 74,2	- 84,9
05/7..12	\bar{x} V	1,2 17,2 %	1,0	0,07 152 %	11,0 16,6 %	1,60 1,3 %	48,7 13,2 %	+ 61,4	- 64,6

alle Prüfkörper 4 d in Form, nach Stopfen gelockert, bis Prüfung unter Folie, Klima 20/65

- 1) HGZ-Faserstopfmörtel 78/15/7; $x_F = 0,05$; $W = 0,5$;
- 2) Sulfatkomponente aus 0,7 AH und 0,3 KGN; Retardananteil $z = 0,0008$;
- 3) ab dieser Versuchsnummer HGZ-Standard-Faserstopfmörtel (85/10/5; $W = 0,4$; $x_F = 0,05$); und händig gestopft, in vertikal angeordnete Fugen (Form liegt horizontal)

Haftzugfestigkeit von Doppelstein-Prüfkörpern aus Elmkalkstein und
HGZ-Faserstopfmörtel sowie Festmörteleigenschaften
(manuell gestopft, HS : AH : PZ = 85 : 10 : 5; W = 0,4; $x_F = 0,05$)

Versuchs- Nr.		Mittlere Steinfeuchtig- keit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzug- festig- keit n. 28 d β_{HZ} (n = 6)	Festmörtel (n = 5 ... 6)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)	
					Prüffeuchte Mörtel	Trocken- roh-dichte	Trocken- druckfe- stigkeit		
		u (n = 12)	t					Steine	Mörtel
-		M-%	h	N/mm ²	M-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
06/ 1 ... 6	\bar{x} V	1,6 24,7 %	1	0,61 15,7 %	17,6 3,2 %	1,64 1,3 %	80,4 4,6 %	- 18,2	- 7,5
06/ 7 ... 9	\bar{x} V	1,7 33,1 %	1	0,56 2) 26,3 %	17,7 2) 12,4 %	1,64 1,2 %	65,8 1,8 %	- 10,6	+ 9,1
21/ 1) 1 ... 6	\bar{x} V	1,4 20,2 %	1	0,27 41,6 %	18,9 1,9 %	1,62 1,8 %	66,6 4,3 %	- 20,1	- 4,6
35/ 1) 1 ... 6	\bar{x} V	1,4 19,3 %	1	0,09 24,0 %	20,7 1,9 %	1,56 1,0 %	64,7 2,9 %	- 16,6	- 7,7
36/ 1) 1 ... 6	\bar{x} V	1,4 17,0 %	1	0,17 34,0 %	18,8 1,9 %	1,62 0,7 %	71,0 3,5 %	- 24,0	- 5,6
37/ 1) 1 ... 6	\bar{x} V	1,8 30,7 %	1	0,56 36,6 %	19,7 4,7 %	1,58 1,3 %	65,5 4,9 %	+ 42,6	- 12,1
38/ 1) 1 ... 6	\bar{x} V	1,6 13,8 %	1	0,36 28,7 %	18,4 3,7 %	1,66 2,7 %	78,3 7,6 %	+ 7,9	- 14,9

1) Prüfkörper bis Prüftag (28. Tag) in Stahlform allseitig und mit Druckbalken fest eingespannt

2) n = 3

Versuche Nr. 35 bis Nr. 38: Variation Mischerart und Stopfperson:

stationärer Mischer: Nr. 35 und Nr. 37; Stopfperson S und P

mobiler Mischer: Nr. 36 und Nr. 38; Stopfperson S und P

Versuche Nr. 37 und Nr. 38 wurden intensiver nachbehandelt (höheres Feuchtigkeitsangebot);

Farbe Mörtelplatten bei Prüfung intensiv blaugrün über Stopfhöhe (Abdeckung feuchtes Tuch und Folie)

Versuche Nr. 35 und Nr. 36: Farbe Mörtelplatten "unten" (zuerst gestopft) noch blaugrün, nach "oben" zu graue Farbe (Abdeckung Folie, feuchtes Tuch, Folie)

Feuchte Tücher alle 5 Tage neu befeuchtet, Prüfkörper lagerten horizontal

- Anlage 63 -

Haftzugfestigkeit von Doppelstein-Prüfkörpern aus Rüthener Grünsandstein und
HGZ-Faserstopfmörtel sowie Festmörteleigenschaften
(manuell gestopft; HS : AH : PZ = 85 : 10 : 5; W = 0,4; $x_F = 0,05$)

Versuchs- Nr.	Mittlere Steinfeuchtig- keit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzug- festig- keit n. 28 d β_{HZ} (n = 6)	Festmörtel (n = 5 ... 6)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)	
				Prüffeuchte Mörtel	Trocken- rohdichte	Trocken- druckfe- stigkeit		
	u (n = 12)	t					Steine	Mörtel
-	M.-%	h	N/mm ²	M.-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
08/ 1 ... 6	\bar{x} 6,8 V 8,5 %	1,0	0,58 21,1 %	18,0 3,4 %	1,71 0,8 %	80,9 8,6 %	- 3,5	- 19,0
08/ 7 ... 9	\bar{x} 6,3 2) V 5,8 %	1,0	0,55 3) 8,6 %	20,7 3) 2,0 %	1,64 0,8 %	70,7 0,4 %	- 7,2	- 2,6
08/ 10 ... 15	\bar{x} 3,8 V 20,4 %	0,5	0,55 17,4 %	17,1 2,6 %	1,71 1,3 %	87,1 0,7 %	+ 6,2	- 14,0
25/ 1 ... 6	\bar{x} 2,5 V 23,3 %	0,17	0,30 23,5 %	17,5 3,1 %	1,68 1,6 %	84,2 5,3 %	+ 13,1	- 20,4
22/ 1) 1 ... 6	\bar{x} 2,3 V 19,5 %	0,17	1,15 23,6 %	13,8 10,6 %	1,67 1,9 %	79,0 12,8 %	- 19,6	- 18,5

- 1) Prüfkörper bis Prüftag (28. Tag) in Stahlform allseitig und mit Druckbalken fest eingespannt
2) n = 6 3) n = 3

Haftzugfestigkeit von Doppelstein-Prüfkörpern aus Herdecker Ruhrsandstein oder
Velpker Sandstein und HGZ-Faserstopfmörtel sowie Festmörteleigenschaften
(manuell gestopft, HS : AH : PZ = 85 : 10 : 5; W = 0,4; $x_F = 0,05$)

Versuchs- Nr.	Mittlere Steinfeuchtig- keit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzug- festig- keit n. 28 d β_{HZ} (n = 5-6)	Festmörtel (n = 4 ... 6)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)	
				Prüffeuchte Mörtel	Trocken- rohdichte	Trocken- druckfe- stigkeit		
	u (n ≥ 10)	t					Steine	Mörtel
-	M.-%	h	N/mm ²	M.-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
07/ 1) 1 ... 6	\bar{x} 0,3 V 8,5 %	1,0	0,02 83,7 %	15,9 4,3 %	1,63 6,3 %	58,4 2,8 %	+ 20,5	- 27,1
20/ 2) 1 ... 5	\bar{x} 0,8 V 21,0 %	1,0	0,37 73,1 %	18,5 1,6 %	1,65 1,3 %	67,9 5,6 %	+ 5,4	- 11,1

- 1) Herdecker Ruhrsandstein
2) Velpker Sandstein

Mörtelplatten aus Doppelstein-Probekörpern mit typischem Steinanhang
(Beispiele)



Bild 1: Rüthener Grünsandstein-Anhang
an HGZ-Faserstopfmörtel (Platte 8/14);
abgelöste Fläche (Schräglich)

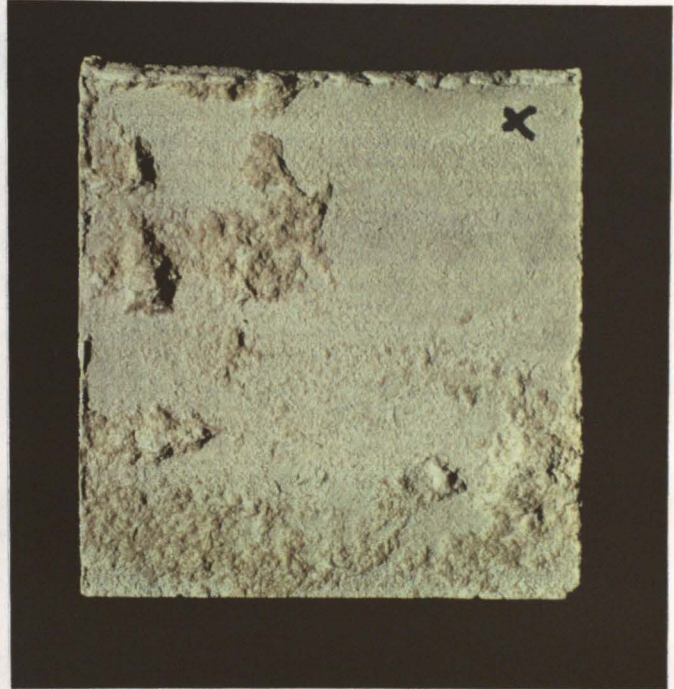


Bild 2: Elmkalkstein-Anhang an
HGZ-Faserstopfmörtel (Platte 06/9);
abgelöste Fläche (Schräglich)



Bild 3: Sander Schilfsandstein-Anhang an
Favoriten-HGZ-Faserstopfmörtel (Platte 30/8),
abgelöste Fläche (Schräglich)



Bild 4: Sander Schilfsandstein-Anhang an
HS/PZ/TEZ-Faserstopfmörtel (Platte 39/12);
abgelöste Fläche (Schräglich)

- Anlage 65 -

Einfluß haftungsvermittelnder Schlämme auf die Haftzugfestigkeit von Doppelsteinprüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel (tlw. modifiziert) sowie Festmörtel Eigenschaften (manuell gestopft, HGZ-Faserstopfmörtel: 85/10/5; $W = 0,4$; $x_F = 0,05$)

Schlämmeart	Versuchs-Nr.	Mittlere Steinfestigkeit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzugfestigkeit n. 28 d β_{HZ} (n=4-6)	Festmörtel (n = 4 ... 6)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)		
		u (n = 12)	t		Prüffeuchte Mörtel	Trockenroh-dichte	Trocken-druckfestigkeit	Steine	Mörtel	
-	-		M.-%	h	N/mm ²	M.-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
ohne	05/7 ... 12	\bar{x} 1,8 V 2,8 %	4,5	0,07 152 %	10,9 10,3 %	1,60 1,3 %	48,7 13,2 %	+ 61,4	- 64,6	
handelübliche Feinheit der HGZ-Komponenten	1) 13/1 ... 6 (0,16 h alt)	\bar{x} 1,3 V 3,5 %	1,0	0,37 16,3 %	12,4 3,6 %	1,63 0,3 %	58,1 3,1 %	+ 38,2	- 43,7	
	2) 9/1 ... 6 (1 h alt)	\bar{x} 1,5 V 5,1 %	1,0	0,17 30,6 %	12,6 4,2 %	1,62 2,4 %	58,8 5,8 %	+ 29,3	- 33,0	
	3) 12/1 ... 6 (24 h alt)	\bar{x} 1,3 V 4,8 %	1,0	0,05 170 %	11,6 4,8 %	1,63 1,8 %	55,9 10,4 %	+ 39,6	- 45,0	
nachge-mahlen	4) 16/1 ... 6 (0,5 h alt)	\bar{x} 1,3 V 8,0 %	1,0	0,49 29,4 %	11,7 3,9 %	1,63 2,2 %	53,6 10,3 %	+ 61,9	- 65,9	
Nafufill BB2	5) 10/1 ... 6 (1 h alt)	\bar{x} 1,5 V 9,8 %	1,0	1,12 14,8 %	10,4 3,8 %	1,65 0,3 %	63,2 2,8 %	+ 41,5	- 43,9	
	6) 17/1 ... 6 (1 h alt)	\bar{x} 1,1 V 12,0 %	1,0	0,19 69,4 %	7,8 3,1 %	1,63 1,0 %	60,6 3,4 %	+ 58,4	- 66,3	
	7) 19/1 ... 6	\bar{x} 1,0 V 6,5 %	1,0	0,05 104 %	6,9 7,4 %	1,65 0,7 %	59,2 6,1 %	+ 44,5	- 48,9	
MC 13	8) 11/1 ... 6	\bar{x} 1,4 V 4,2 %	1,0	0,29 49,7 %	10,8 10,2 %	1,60 0,9 %	53,6 7,3 %	+ 46,2	- 49,4	

- 1) modifizierte HGZ-Schlämme (HSD/KGN/PZ = 83/10/7; $W = 0,9$; 0,3 % Stabilisierer ST 1, bzg. auf BM-Masse); kapillar befeuchtete Steine 1 h abgedeckt belassen, dann Schlämmauftrag mit Flachpinsel; nach 10 min "naß in naß" Fugen mit Standard-HGZ-Faserstopfmörtel gestopft.
- 2) Schlämme und HGZ-Faserstopfmörtel wie 1); Schlämmealter 1 h beim Stopfen der Fugen
- 3) wie 1); Schlämmealter 24 h beim Stopfen der Fugen
- 4) wie 1); alle HGZ-Komponenten auf etwa 10 000 cm²/g nachgemahlen; Schlämmealter 0,5 h beim Stopfen der Fugen
- 5) mit Nafufill BB2 (MC-Bauchemie) modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel (10 % BB2, bzg. auf BM-Masse) und Nafufill BB2-haltige Schlämme (HSD/KGN/PZ = 85/7/8; $W = 0,9$; Wasser : BB2 = 1 : 1, 0,1 % Stabilisierer ST 1), Schlämmealter 1 h beim Stopfen der Fugen; sonst wie 1)
- 6) nicht modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel (Standard); Schlämme und Verfahren wie 5)
- 7) mit Nafufill BB2 modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel (Standard; 10 % BB2, bzg. auf BM-Masse)
- 8) mit MC 13 (MC Bauchemie) modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel (10 % MC 13, bzg. auf BM-Masse) und MC 13haltige Schlämme (HSD/KGN/PZ = 85/7/8; $W = 0,9$; Wasser : MC 13 = 1 : 3; 0,1 % Stabilisierer ST 1); Schlämmauftrag wie 5)

**Einfluß Polymer-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel
auf die Haftzugfestigkeit von Sander Schilfsand-
stein-Prüfkörper sowie Festmörteleigenschaften**

(manuell gestopft, HGZ-Faserstopfmörtel 85/10/5;
 $W = 0,4$; $x_F = 0,05$)

Versuchs- Nr.		Mittlere Steinfeuchtig- keit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzug- festig- keit n. 28 d β_{HZ} (n = 6)	Festmörtel (n = 4 ... 5)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)	
		u (n = 12)	t		Prüffeuchte Mörtel	Trocken- rohdichte	Trocken- druckfe- stigkeit	Steine	Mörtel
-		M.-%	h	N/mm ²	M.-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
23/ 1 ... 6 1)	\bar{x} V	1,1 3,3 %	1,0 1)	0,31 73,2 %	5,0 14,2 %	1,36 1,6 %	18,5 19,5 %	+ 69,4	- 69,9
23/ 7 ... 12 2)	\bar{x} V	1,1 4,3 %	1,0 2)	0,96 33,3 %	6,1 4,2 %	1,53 2,1 %	47,0 5,1 %	+ 46,1	- 46,0
31/ 1 ... 6 3)	\bar{x} V	1,6 17,9 %	1,0 3)	0,24 59,6 %	12,6 3,8 %	1,60 0,8 %	56,4 6,4 %	+ 38,5	- 44,4

- 1) HGZ-Faserstopfmörtel (85/10/5; $W = 0,4$; $x_F = 0,05$) mit Mowiton LDM 3750 (Hoechst AG) modifiziert (Zugabe von 10 % Feststoff, bzgl. auf BM-Masse); Prüfkörper ab 6. Tag zwängungsfrei in Folientüten in 20/65 gelagert
- 2) HGZ-Faserstopfmörtel (siehe 1); $W = 0,35$) mit Mowilith LDM 6880 (Hoechst AG) modifiziert (Zugabe von 11,7 % Feststoff, bzgl. auf BM-Masse); Lagerung wie 1)
- 3) HGZ-Faserstopfmörtel (85/10/5; $W = 0,4$, $x_F = 0,05$) mit 0,4 % Stabilisierer ST 2 Addiment modifiziert; Prüfkörper ab 4. Tag zwängungsfrei in Folientüten in 20/65 gelagert.

- Anlage 67 -

Einfluß Methylcellulose-modifizierter HGZ-Faserstopfmörtel auf die Haftzugfestigkeit von Sander Schilfsandstein-Prüfkörpern sowie Festmörtелеigenschaften

(manuell gestopft; HGZ-Faserstopfmörtel: 85/10/5; $W = 0,4$; $x_F = 0,05$)

Versuchs-Nr.	Mittlere Steinfeuchtigkeit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von		MC-Zugabe (bez. auf BM) x_{MC}	Haftzugfestigkeit n. 28 d β_{HZ} (n = 5-6)	Festmörtel (n = 3 ... 5)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)		
	u (n = 12)	t			Prüffeuchte Mörtel	Trockenroh-dichte	Trockendruckfestigkeit	Steine	Mörtel	
-		M.-%	h		N/mm ²	M.-%	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
14/1 ... 6 1)	\bar{x} V	0,9 9,1 %	1,0		0,34 54,9 %	10,0 8,1 %	1,53 0,4 %	42,6 4,2 %	+ 49,3	- 51,8
14/7 ... 12 1)	\bar{x} V	0,7 8,1 %	1,0		0,78 20,5 %	8,8 3,8 %	1,49 0,8 %	40,8 9,1 %	+ 57,5	- 60,1
15/1 ... 6 2)	\bar{x} V	1,3 10,1 %	1,0		0,41 47,6 %	14,4 11,2 %	1,48 1,3 %	39,8 10,6 %	+ 70,7	- 74,0
18/1 ... 6 3)	\bar{x} V	1,3 7,6 %	1,0		0,65 24,0 %	8,9 11,6 %	1,61 1,9 %	46,3 19,8 %	+ 36,2	- 38,6
26/1 ... 6 4)	\bar{x} V	1,4 3,8 %	1,0		0,45 14,7 %	11,7 9,2 %	1,51 1,7 %	51,0 5,0 %	+ 54,4	- 56,6
26/7 ... 12 5)	\bar{x} V	1,3 2,7 %	1,0		0,19 20,5 %	11,4 8,7 %	1,55 0,9 %	47,1 4,2 %	+ 41,4	- 41,6
24/1 ... 6 6)	\bar{x} V	1,2 2,7 %	1,0		0,65 51,0 %	9,5 6,0 %	1,54 0,8 %	39,3 7,5 %	+ 53,2	- 58,5
24/7 ... 12 7)	\bar{x} V	1,2 4,7 %	1,0		0,40 46,1 %	8,3 9,8 %	1,53 2,1 %	38,6 18,6 %	+ 49,0	- 50,8

- 1) MC-Walocel MKX 15000 PP 11 (Wolff Walsrode AG); trocken dem HGZ-BM untergemischt, zwangsfreie Lagerung der Prüfkörper unter Folie und Folientüten bis Prüftag am 28. Tag; $W = 0,40$
- 2) MC Tylose BA 3726 (Hoechst AG); $x_{MC} = 0,0026$; wie 1);
- 3) Mischung aus 85 % MC Walocel MKX 15000 PP11 + 15 % MC Tylose BA 3726; $W = 0,35$, zwangsfreie Lagerung der Prüfkörper wie 1);
- 4) wie 1), $W = 0,38$, Prüfkörper bis Prüfung am 28. Tag fest in Stahlform eingespannt; $x_{MC} = 0,0032$; Lagerung Form im Foliensack in 20/65;
- 5) MC Tylose MH 2000 XP, $W = 0,40$; Prüfkörper bis Prüfung fest eingespannt, in Foliensack (siehe 4));
- 6) wie 3), $W = 0,39$; zwangsfreie Lagerung der Prüfkörper, hochdruckwasserstrahl-geschnittene Sander Schilfsandsteine:
- 7) wie 3), $W = 0,39$; Prüfkörper bis Prüfung am 28. Tag fest eingespannt, Steine wie 6).

- Anlage 68 -

Einfluß schrumpf- bzw. schwindkompensierter HGZ-Faserstopfmörtel auf die Haftzugfestigkeit von Sander Schilfsandstein-Prüfkörpern sowie Festmörtelleigenschaften

(manuell gestopft)

Versuchs-Nr.	Mittlere Steinfeuchtigkeit nach kapillarer Befeuchtungsdauer von			Haftzugfestigkeit n. 28 d β_{HZ} (n = 6)	Festmörtel (n = 2 ... 5)			Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin (geschätzt)	
			Prüffeuchte Mörtel		Trockenroh-dichte	Trocken-druckfestigkeit			
	u (n = 12)	t					Steine	Mörtel	
-		M. - %	h	N/mm ²	M. - %	kg/dm ³	N/mm ²	g	g
39/1 ... 6 1)	\bar{x} V	1,7 3,6 %	1,0	0,77 24,6 %	8,6 6,9 %	1,65 2,3 %	57,1 15,7 %	+ 20,5	- 29,5
39/7 ... 12 2)	\bar{x} V	1,6 6,8 %	1,0	0,82 11,6 %	9,7 10,8 %	1,78 1,6 %	73,4 13,8 %	+ 13,3	- 31,0
29/1 ... 6 3)	\bar{x} V	1,2 30,2 %	1,0	0,15 96,3 %	14,0 28,9 %	1,41 -	33,7 18,3 %	+ 50,0	- 56,7
29/7 ... 12 4)	\bar{x} V	1,9 19,0 %	1,0	0,61 45,4 %	11,6 5,9 %	1,68 -	72,9 9,5 %	+ 26,8	- 36,3
30/1 ... 6 5)	\bar{x} V	1,3 13,6 %	1,0	0,60 49,4 %	12,7 6,3 %	n. b.	n. b.	+ 29,5	- 35,1
30/7 ... 12 6)	\bar{x} V	1,3 8,1 %	1,0	0,58 16,2 %	13,4 7,8 %	n. b.	n. b.	+ 21,0	- 25,7

- 1) Spezial-Faserstopfmörtel HSD : PZ : TEZ = 1 : 1 : 1; W = 0,4; $x_f = 0,05$;
zwangsfreie Lagerung der Prüfkörper unter Folie und Folientüten in 20/65 bis Prüfung
- 2) wie 1), Prüfkörper in Form bis Prüfung fest eingespannt, in Foliensack, 20/65, hochkant;
- 3) Schrumpf- und schwindkompensierter HGZ-Faserstopfmörtel HSD : AH : PZ : TEZ =
0,73 : 0,13 : 0,04 : 0,10; W = 0,4, $x_f = 0,05$; zwangsfreie Lagerung wie 1); (n = 4)
- 4) wie 3); Prüfkörper in Form bis Prüfung fest eingespannt, wie 2);
- 5) verzögerter schrumpf- und schwindkompensierter HGZ-Faserstopfmörtel wie 3),
zwangsfreie Lagerung der Prüfkörper wie 1);
- 6) verzögerter schrumpf- und schwindkompensierter HGZ-Faserstopfmörtel wie 5),
Prüfkörper in Form fest eingespannt wie 2).

Versuchs-Nr.		Mittlere Steinfeuchtigkeit nach Tauchen und kapillarer Befeuchtungsdauer von		Haftzugfestigkeit β_{HZ} nach (6 $\geq n \leq 8$)			Festmörtel (4 $\geq n \leq 8$)									Feuchtigkeitsbilanz Masseaufnahme bis Prüftermin	
							Prüffeuchte (n = 6)			Trockenrohdichte (n = 5)			Trockendruckfestigkeit (n = 5)			Sander Sandstein	Mörtel
		u (n ≥ 12)	t	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d	28 d	28 d
-		M.-%	h	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	M.-%	M.-%	M.-%	kg/dm ³	kg/dm ³	kg/dm ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	g	g
27/1 ... 6 1)	\bar{x} V	1,4 3,5 %	1,0	-	0,13 39,4 %	-	-	3,4 13,9 %	-	-	2,06 1,2 %	-	-	57,6 10,9 %	-	+ 29,3 48,2 %	- 37,1 42,3 %
27/7 ... 12 2)	\bar{x} V	1,5 5,8 %	1,0	-	0,03 130 %	-	-	3,1 27,3 %	-	-	1,46 3,0 %	-	-	5,8 34,5 %	-	+ 27,8 36,2 %	- 38,5 28,7 %
28/1 ... 6 3)	\bar{x} V	1,5 5,4 %	1,0	-	0,09 76 %	-	-	4,4 11,4 %	-	-	n. b.	-	-	n. b.	-	+ 58,7 22,9 %	- 65,2 16,3 %
03 K 1/1 ... 6 03 K 1/7 ... 12 03 K 1/13 ... 18	\bar{x} V \bar{x} V \bar{x} V	3,1 35,9 % 3,6 29,2 % 4,0 9,6 %	4,5 4)	0,70 61,5 %	0,93 77,3 %	1,79 10,9 %	7,4 13,2 %	5,6 -	n.b.	1,90 0,6 %	n. b.	n.b.	57,8 23,0 %	n. b.	n.b.	-	-
04 K 1/1 ... 8 04 K 1/9 ... 16 04 K 1/17 ... 24	\bar{x} V \bar{x} V \bar{x} V	3,3 16,2 % 3,9 36,2 % 3,5 22,0 %	4,5 5)	0,12 100 %	0,21 128 %	0,07 94,5 %	5,0 10,6 %	3,4 20,8 %	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n.b.	-	-
04 K 2/1 ... 8 04 K 2/9 ... 16	\bar{x} V \bar{x} V	3,8 30,4 % 4,0 23,7 %	4,5 6)	-	0,06 58,3 %	0,33 68,1 %	-	5,0 17,5 %	-	-	n. b.	n.b.	-	n. b.	n.b.	-	-
40/1 ... 6 40/7 ... 12	\bar{x} V \bar{x} V	0,9 7,0 % 1,0 12,5 %	1,0 8)	-	0,19 30,6 %	-	-	4,5 21,6 %	-	-	-	-	-	-	-	+ 51,7	- 51,7
					0,28 58,2 %	-	-	4,9 20,5 %	-	-	-	-	-	-	-	+ 48,1	- 51,8

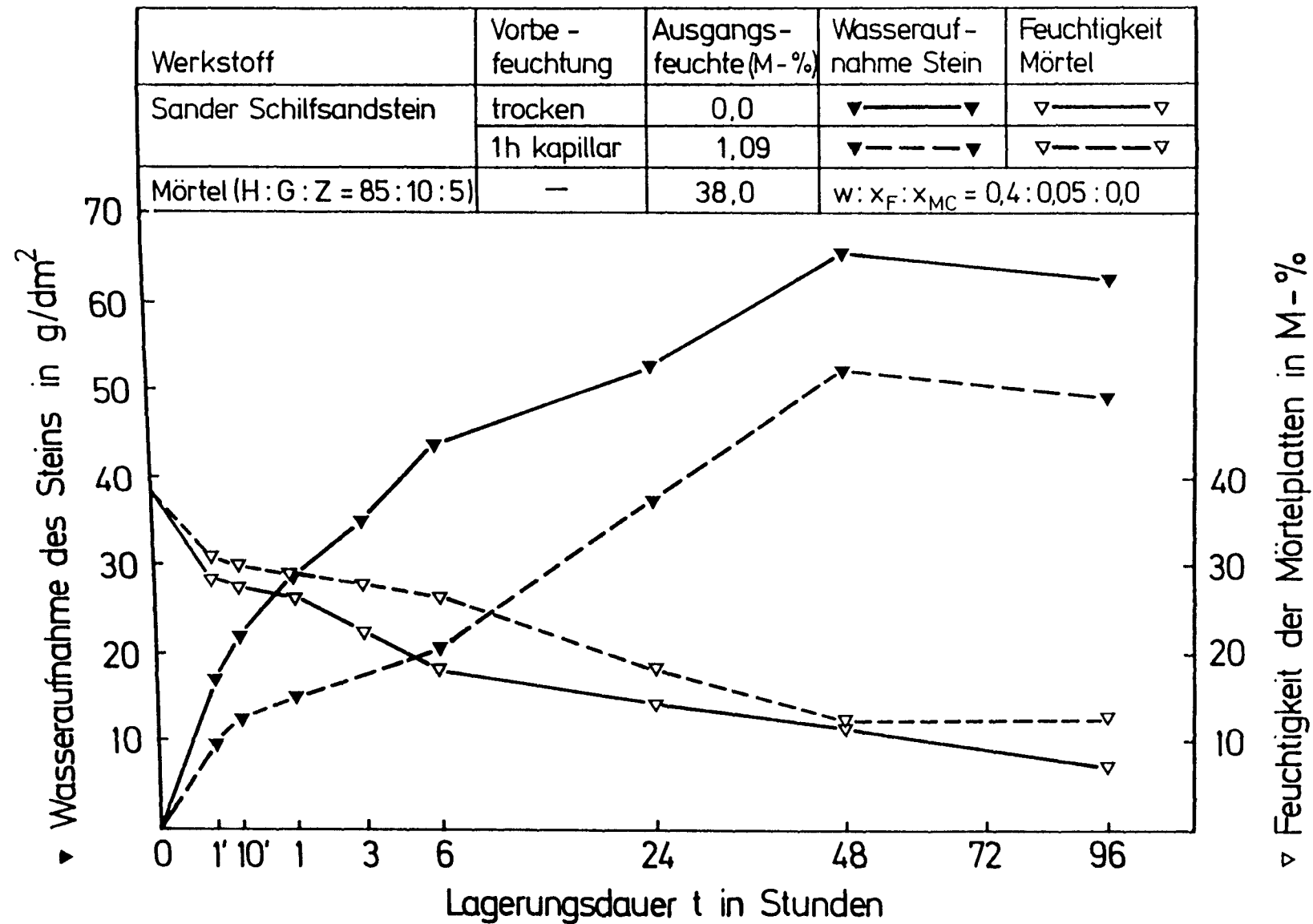
1) Tubag Traß-Kalk-Mörtel; Wasseranteil W* = 0,096 (bezogen auf Trockenmörtel); händig gestopft; zwangfreie Lagerung der Prüfkörper bis Prüfung in Folientüten, Klima 20/65;
2) wie 1); Wasseranteil W* = 0,14;
3) Tubag Restauriermörtel für gipshaltiges Mauerwerk; Wasseranteil W* = 0,14; sonst wie 1);
4) Zentrival FM 10; polymer vergüteter hydraulisch abbindender Fugenmörtel (MC Bauchemie); Wasseranteil W* etwa 0,14; händig gestopft, ab 7. Tag bis Prüftag zwangfreie Lagerung der Prüfkörper offen in 20/65;
5) Zentrival FM 20; Trockenspritzverfahren; ab 7. Tag bis Prüftag offen im Klima 20/65, zwangfreie Lagerung;
6) wie 5); ab 7. Tag bis Prüftag zwangfreie Lagerung der Prüfkörper offen im Klima 20/99;
7) HGZ-Mörtel 78/15/7; x_S = 0,5 (Mörtelsand 0/26), W = 0,31; zwangfreie Lagerung bis Prüfung in Folientüten unter Folie in 20/65;
8) wie 7), bis Prüftermin in Form eingespannt, im Foliensack; Klima 20/65

Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme aus dem HGZ-Faserstopfmörtel durch Natursteine

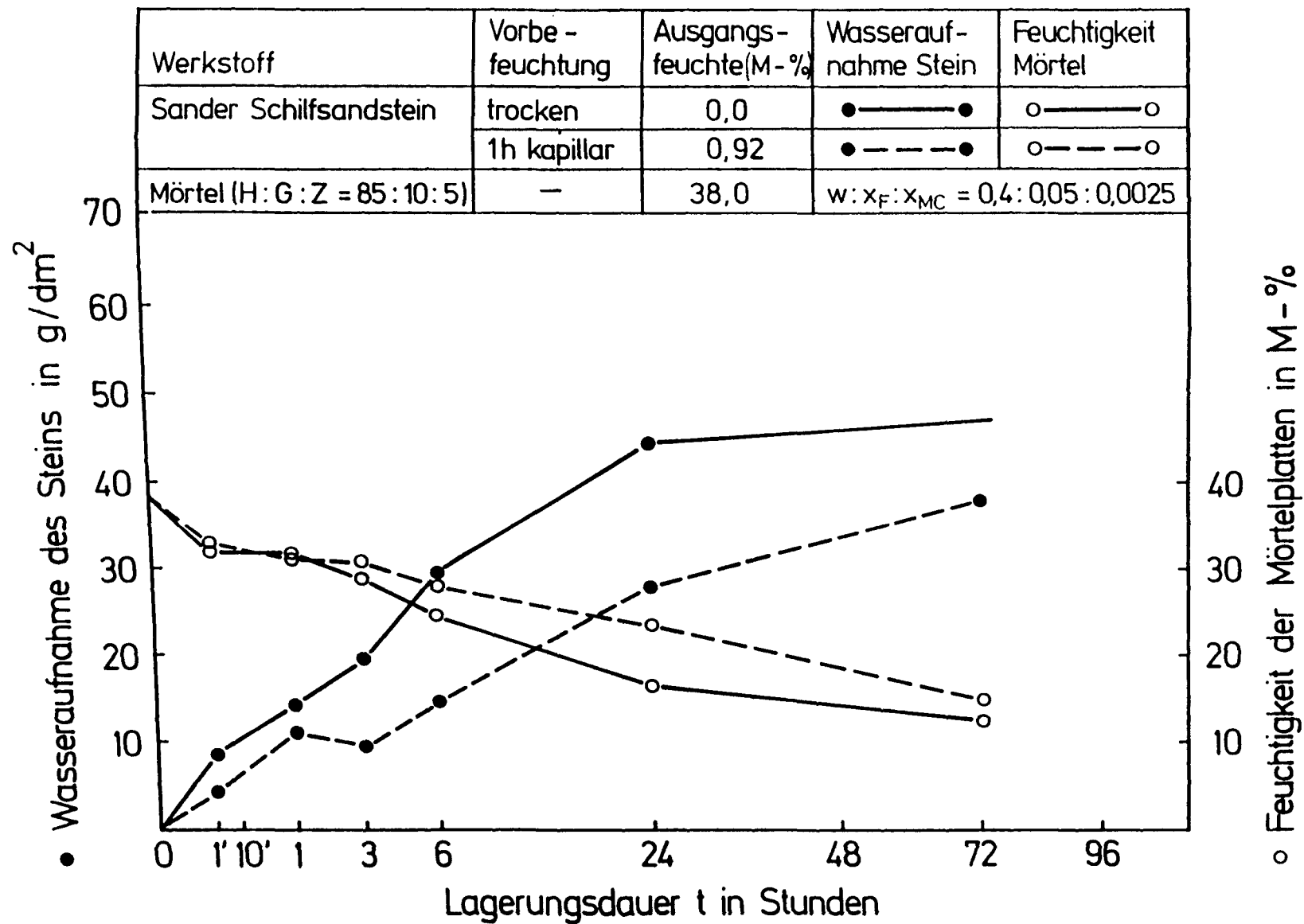
Jeweils ein Zweistein-Prüfkörper aus getrockneten bzw. 1 h lang kapillar vorbefeuchteten Sander Schilfsandsteinen, Rüthener Grünsandsteinen sowie Elmkalksteinen und HGZ-Faserstopfmörtel (85/10/5; $W = 0,4$; $x_F = 0,05$) wurden 1 min, 10 min, 1 h, 3 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h und 96 h nach Herstellende der Form entnommen und gewogen. Nach dem anschließenden Zerlegen der Prüfkörper wurden die Massen der Steine und die vom Stein abgelösten Mörtelplatten bestimmt; am Stein anhaftender Mörtel wurde abgekratzt und der Mörtelplatte zugegeben. Die Feuchtigkeit der Mörtelplatten wurde durch Trocknen bei 60°C ermittelt. Ergänzend dazu wurden 2-Steinprüfkörper aus Schilfsandsteinen und MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel untersucht.

Mit diesen orientierenden Versuchen wurde die Massezunahme verschieden vorbefeuchteter Steinarten infolge kapillaren Aufsaugens von Mörtelwasser an einzelnen Prüfkörpern bestimmt. Diese Versuche ergaben eine orientierende Spannweite der Wasseraufnahmen für diese Natursteinarten.

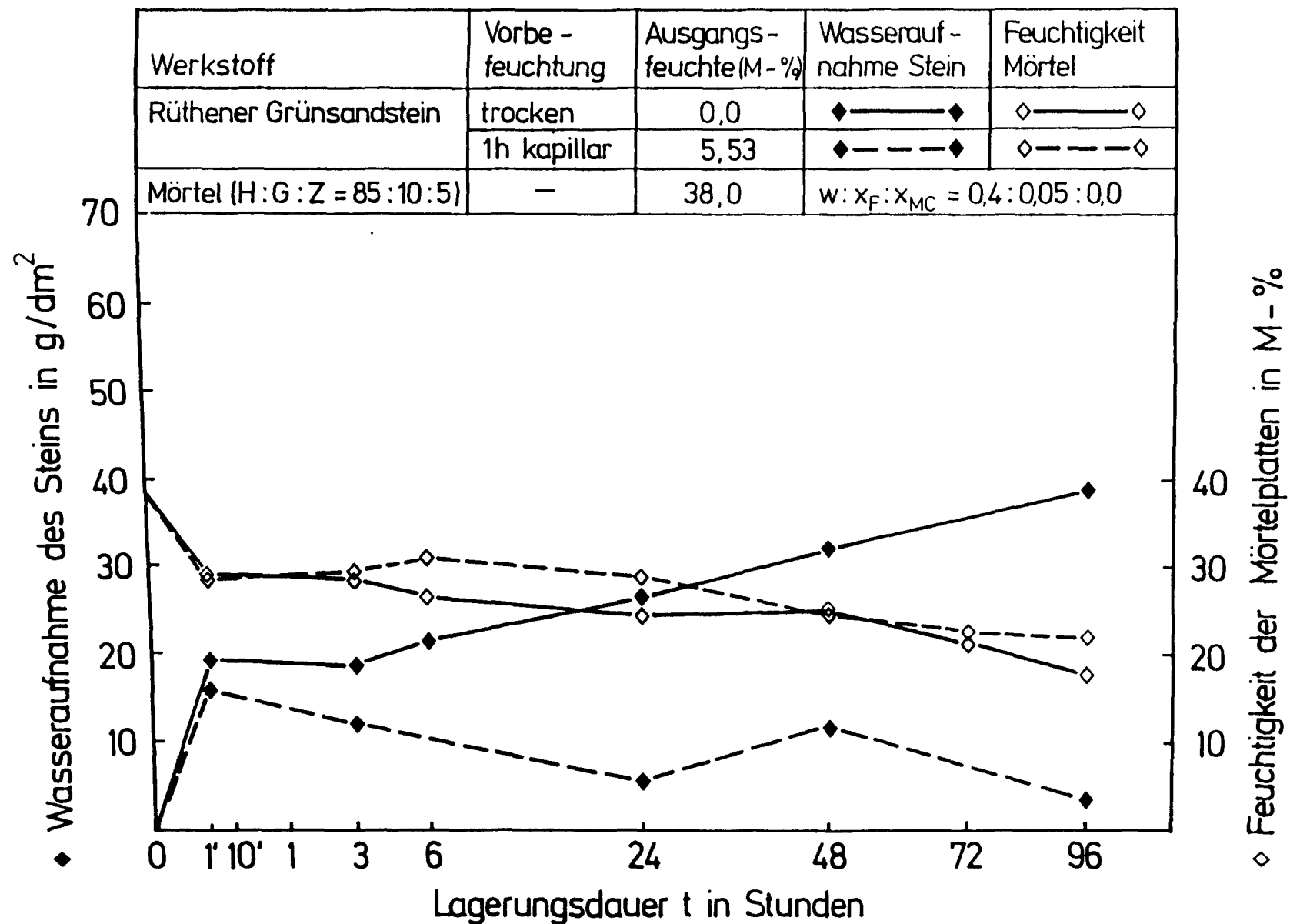
In 2 Stahlformen und fallweise in Formen aus Schalmaterial wurden je Steinart mindestens 12 Prüfkörper hergestellt. Nach jeder Entnahme 2 benachbarter Prüfkörper unterschiedlicher Steinvorbefeuchtung wurde die Form wieder geschlossen. Da beim Versuch mit Grünsandstein vermutlich Prüfkörper aus trockenen Steinen durch benachbarte vorbefeuchtete Steine zusätzlich etwas angefeuchtet wurden, ist beim Versuch mit Elmkalksteinen diese Prüfkörperanordnung verändert worden. Während der Herstellungsdauer der 6 Prüfkörper von etwa 20 min (2 Stopfpersonen) fand bereits ein Wasserübergang vom Mörtel in die Steine statt, der im Prüfwert "1 min nach Stopfende" erfaßt wurde. Da jede Messung nur einmal an einem Prüfkörper durchgeführt werden konnte, wurden die Ergebnisse vermutlich von den natürlichen hygrischen Eigenschaftsschwankungen jeder Steinart mit beeinflußt.



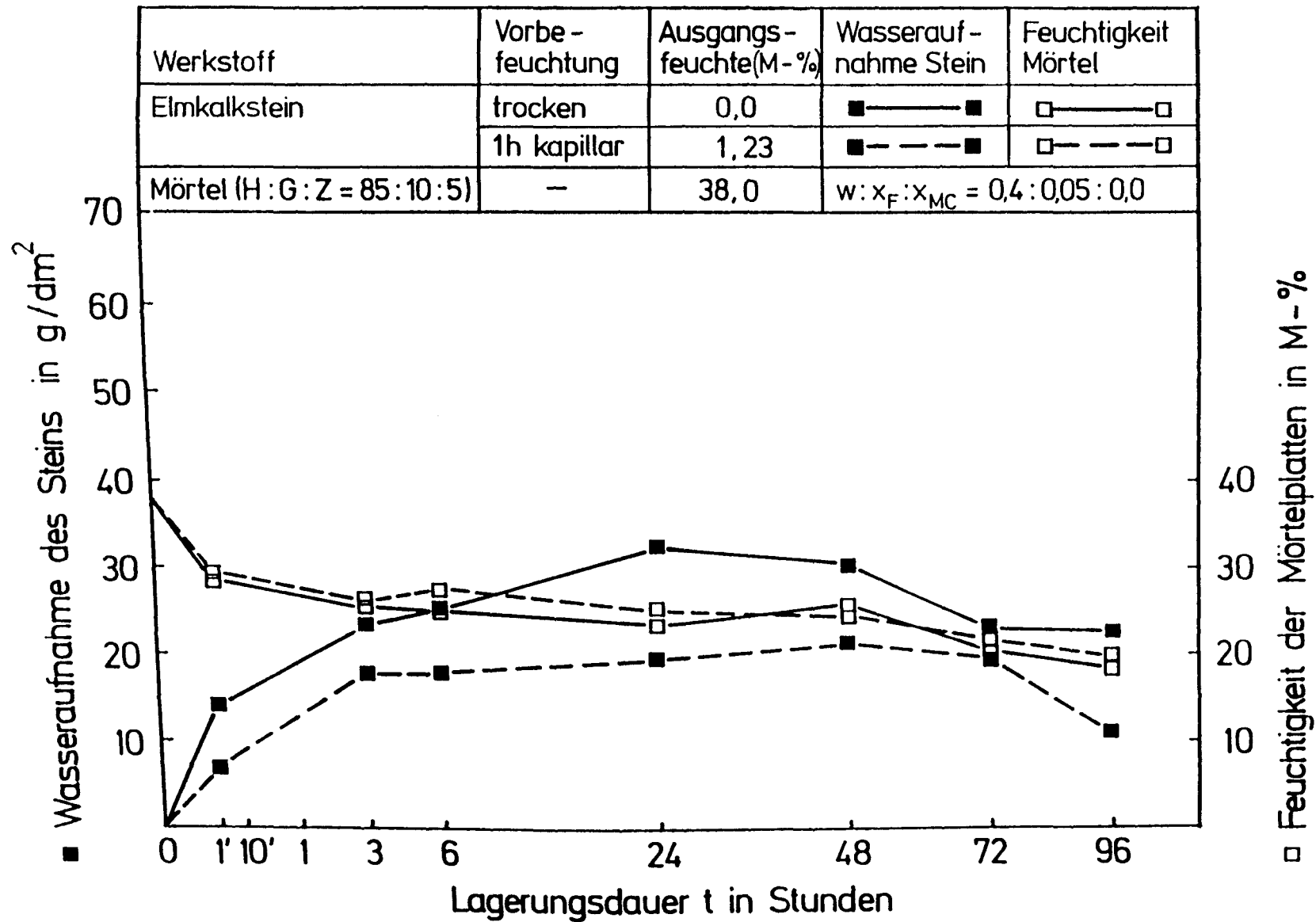
Wasseraufnahme getrockneter bzw. kapillar befeuchteter Sander Schilfsandsteine im Kontakt mit HGZ-Faserstopfmörtel sowie Feuchtigkeitsabnahme des Mörtels wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers



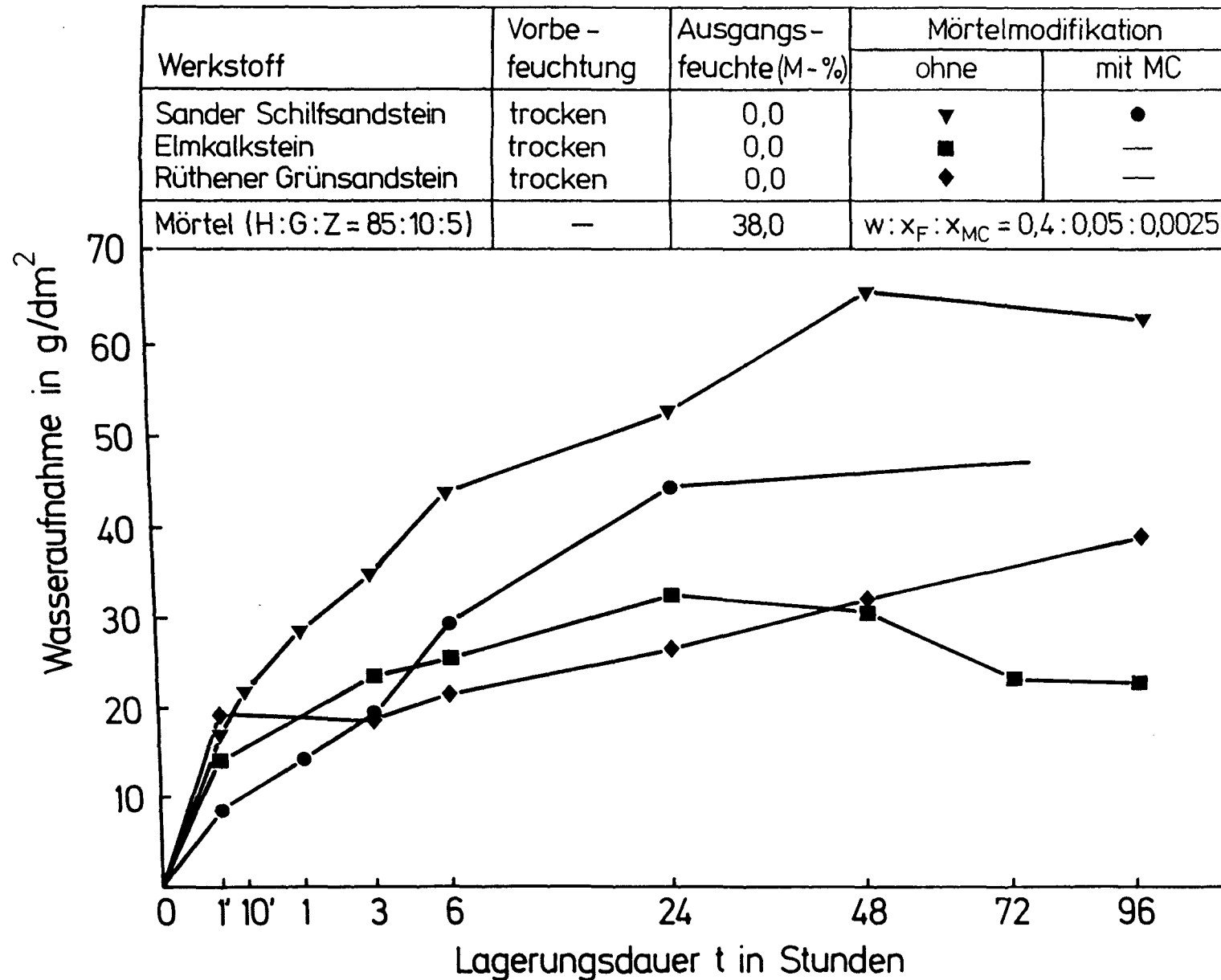
Wasseraufnahme getrockneter bzw. kapillar befeuchteter Sander Schilfsandsteine im Kontakt mit MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel sowie Feuchtigkeitsabnahme des Mörtels wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers



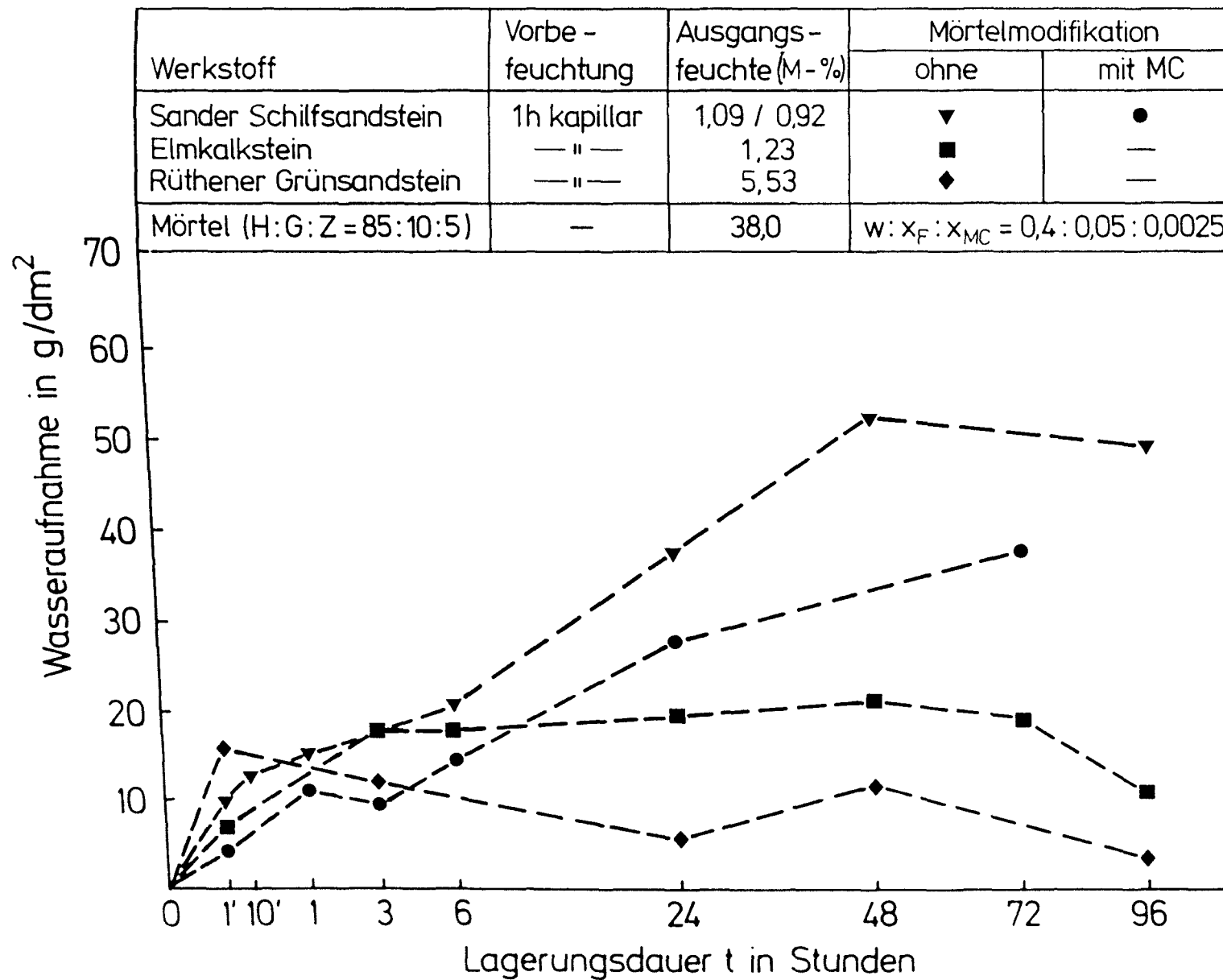
Wasseraufnahme getrockneter bzw. kapillar befeuchteter Rüthener Grünsandsteine im Kontakt mit HGZ-Faserstopfmörtel sowie Feuchtigkeitsabnahme des Mörtels wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers

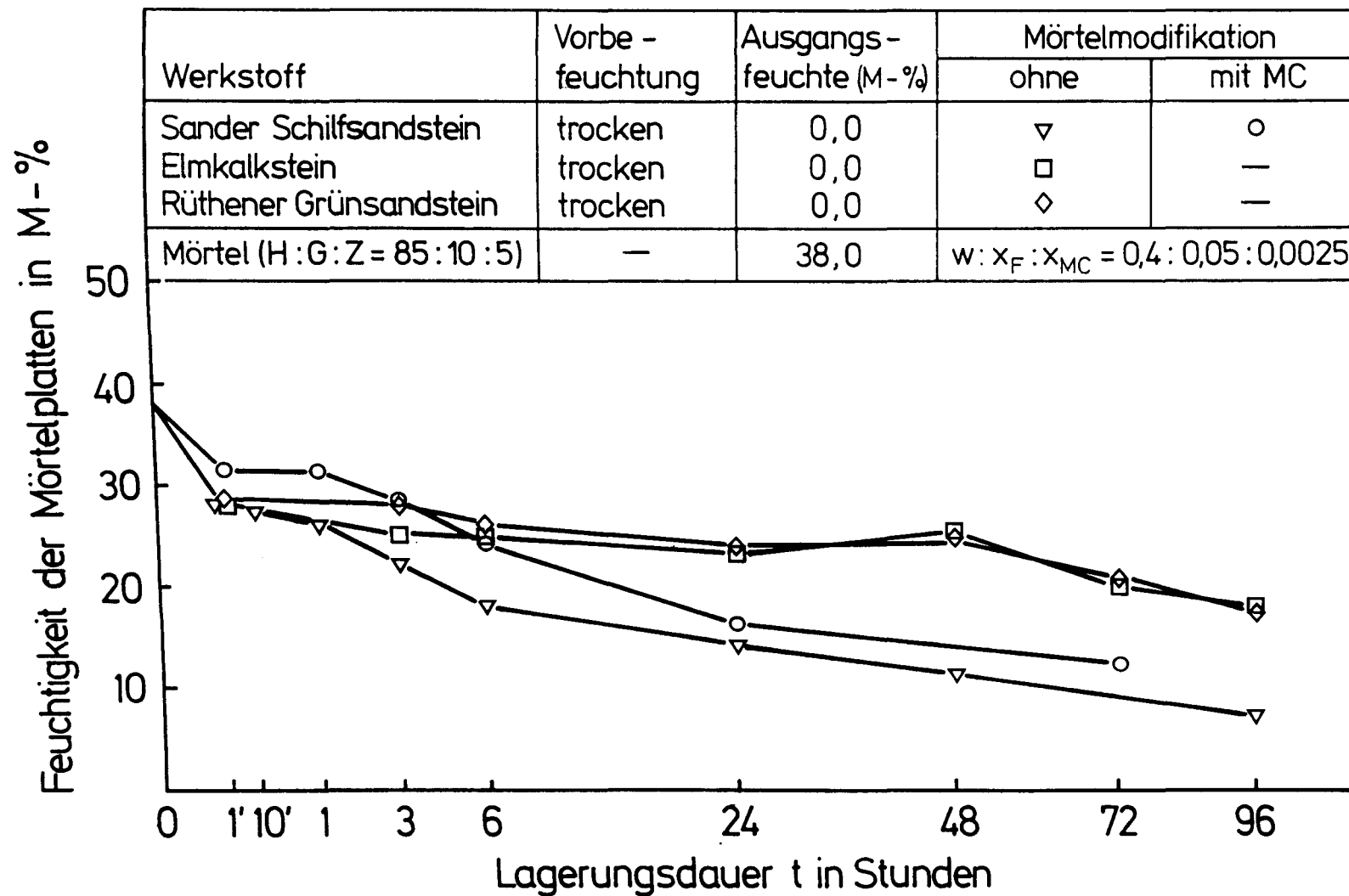


Wasseraufnahme getrockneter bzw. kapillar befeuchteter Elmkalksteine im Kontakt mit HGZ-Faserstopfmörtel sowie Feuchtigkeitsabnahme des Mörtels wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers

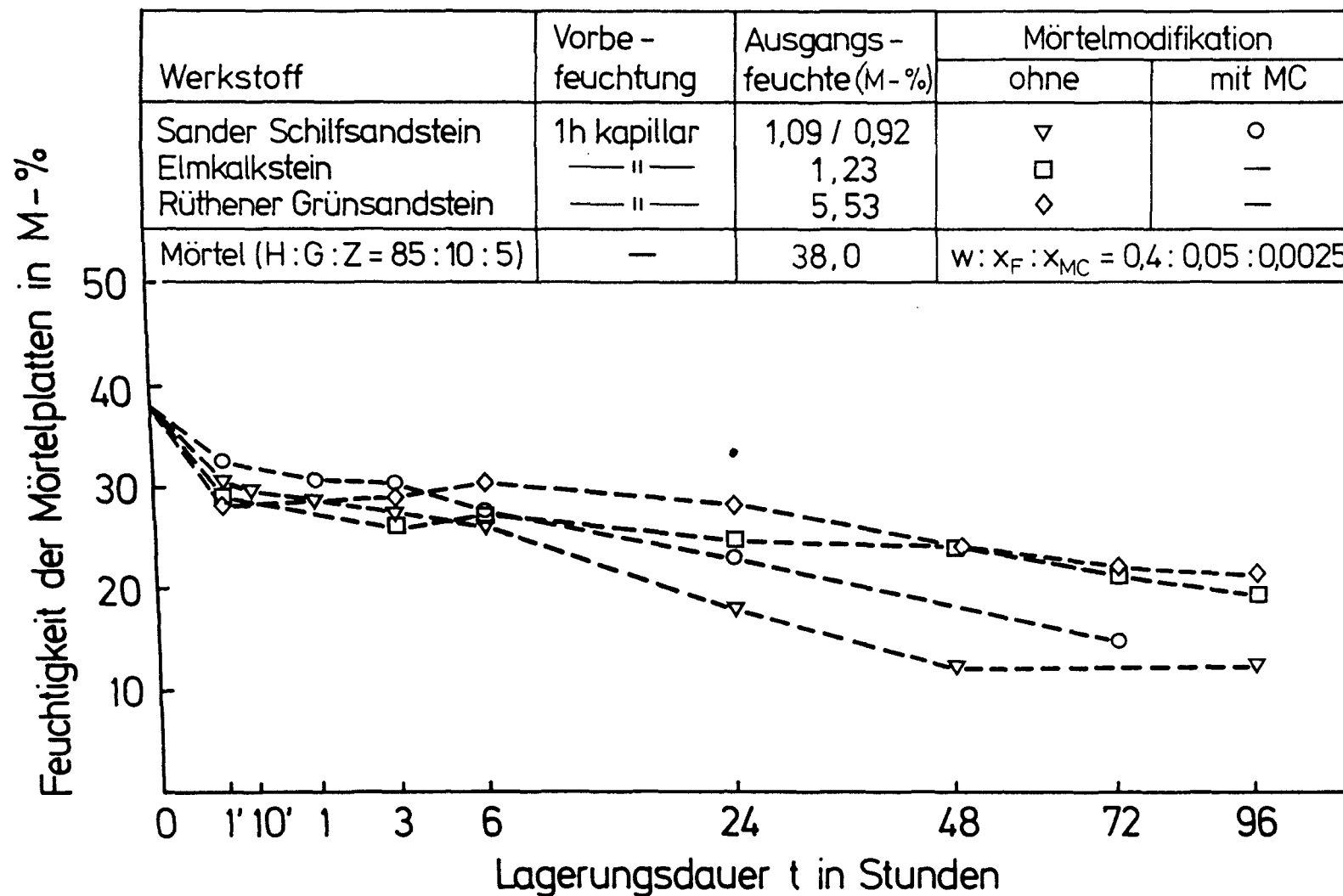


Wasseraufnahme getrockneter Natursteine im Kontakt mit HGZ-Faserstopfmörtel wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers





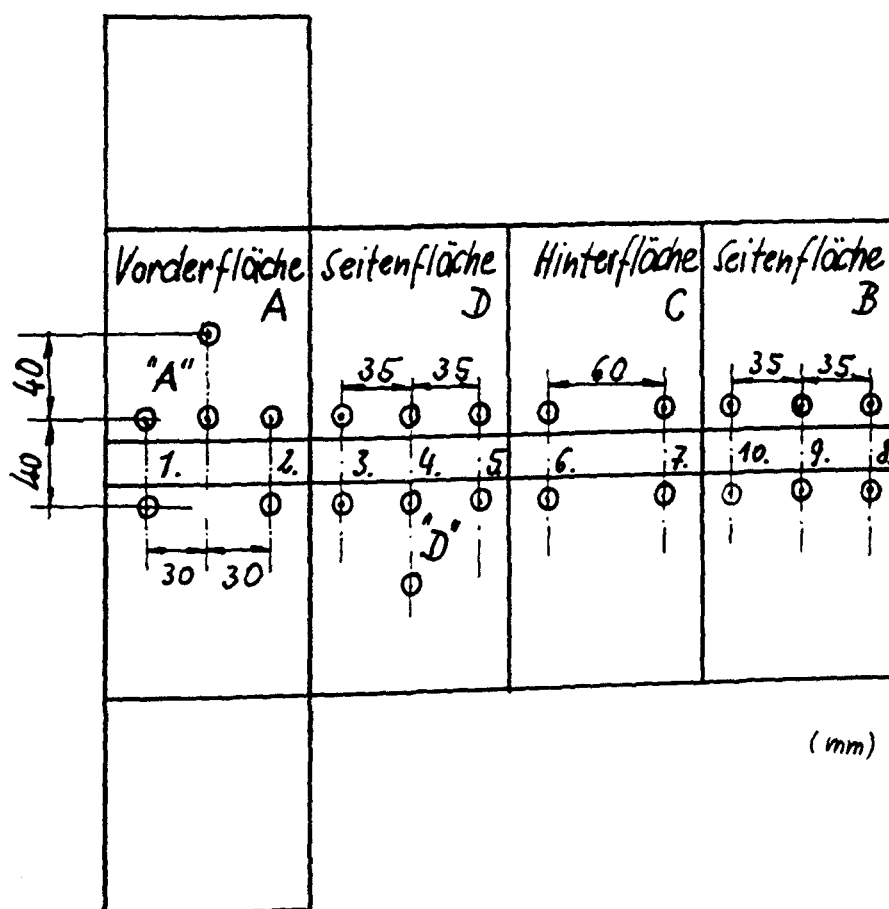
Feuchtigkeitsabnahme verschiedener HGZ-Faserstopfmörtel wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers in trockene Natursteine



Feuchtigkeitsabnahme verschiedener HGZ-Faserstopfmörtel wegen kapillarer Wanderung des Anmachwassers in 1 Stunde lang kapillar befeuchtete Natursteine

Bezeichnung der Meßstellen an Doppelstein-Prüfkörpern aus HGZ-Faserstopfmörtel und Sander Schilfsandstein zur Bestimmung hygrischer Dehnungen

Herstellung: I/1990

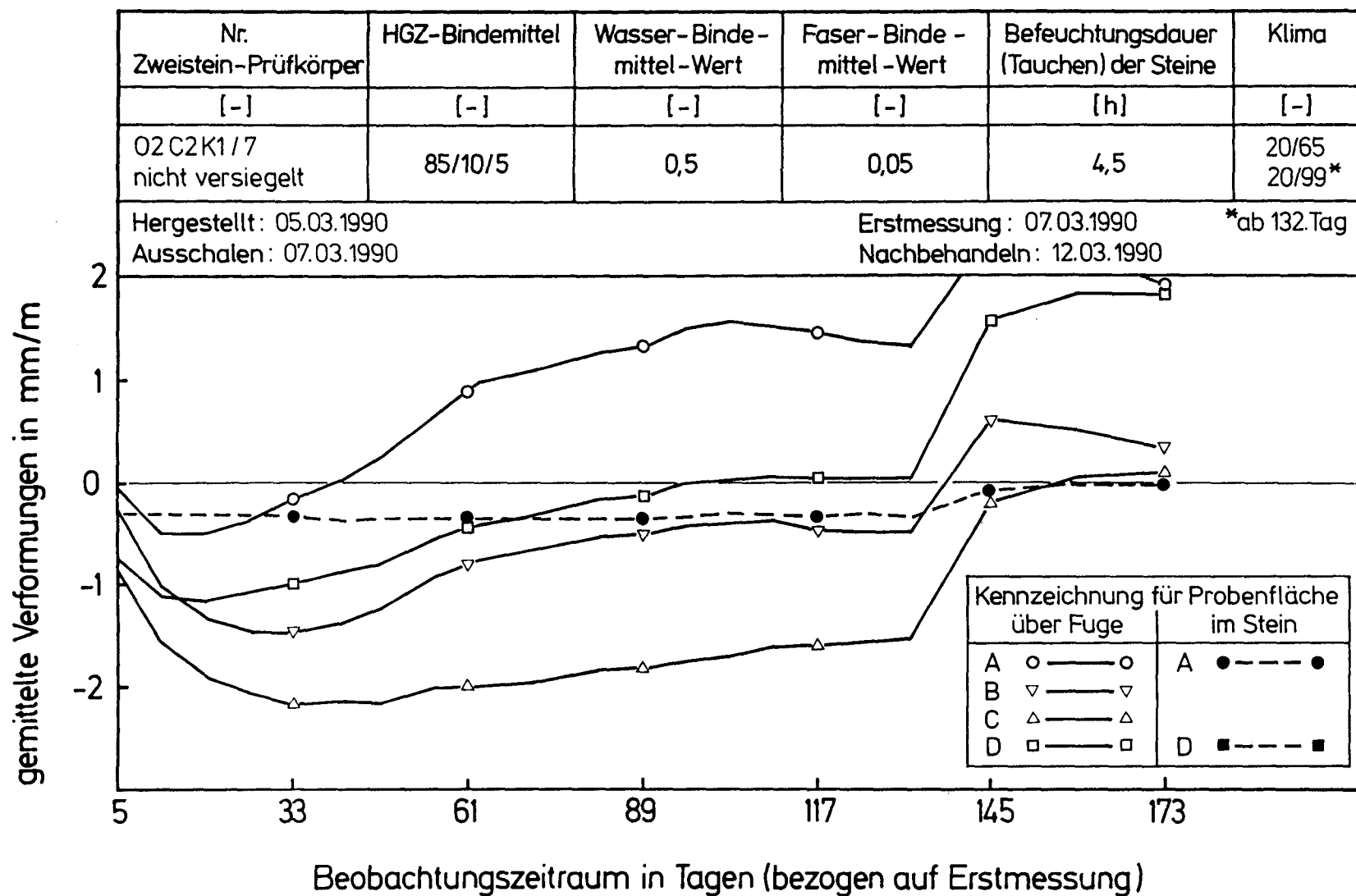


Ergebnisse der Dehnungsmessungen an Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel

Bezeichnung Herstellung	HGZ-Bindemittel W/Z-Wert: 0,5 x _f : 0,05	Befeuchtungsdauer Steine (Tauchen)	Lagerklima	max. Schwindmaß Steine nach ... Tagen		max. Schwindmaß über Mörtelfuge		Versuchstechnische Besonderheiten zu Meßstellen über Fuge
				ε _s	Tage *	ε _s	Tage *	
-	-	h	°C/%	mm/m	d	mm/m	d	-
1.1 C2 K1/1 bis 3 vom 13.02.90	(Ausschalen nach 2 d; Nachbehandlung 7 d, Erstmessung nach 13 d) 85/10/5	1,0	20/65	- 0,43 - 0,59 - 0,28	50 50 28	1) 2) - 1,4/- 2,8 - 1,7/- 2,0 - 1,4/- 1,5	21/72 21/42 14/50	Bei Meßstellen am Stopfende (1 bis 3 und 8) bereits etwa 21 Tage nach Erstmessung wieder Zunahme Meßlänge; übrige Meßstellen zeigen Zunahme erst nach 42 bis 72 Tagen.
02 C2 K1/1 bis 3 vom 20.02.90	(Ausschalen nach 2 d; Nachbehandlung 7 d, Erstmessung nach 7 d) 85/10/5	1,5 min	20/65	- 0,52 - 0,28 - 0,23	42 29 9	- 1,4/- 3,2 - 1,2/- 2,0 - 1,6/- 2,7	14/99 9/28 28/41	Bei Meßstellen am Stopfende (1 bis 3 und 8) bereits nach 9 bis 28 Tagen nach Erstmessung wieder Zunahme Meßlänge; übrige Meßstellen der 3 Proben zeigen das nicht oder frühestens ab 28. Tag bis 141. Tag nach Erstmessung.
02 C2 K1/4 bis 6 vom 28.02.90	(Ausschalen und Erstmessung nach 2 d, Nachbehandlung bis 7. Tag) 85/10/5	1,0	20/65	- 0,71 - 0,33	24 46	- 1,7 - 1,6/- 3,2 - 1,7	24 ... 38 24/141 38 ... 52	Teilweise ab 20. d bis 40. d nach Erstmessung wieder Zunahme der Meßwerte aller Proben infolge Verbundstörung.
02 C2 K1/7 bis 9 vom 05.03.90	(Ausschalen und Erstmessung nach 2 d, Nachbehandlung 7 d) 85/10/5 Probe 7: Anlage 81	4,5	20/65	- 0,43 - 0,85 - 0,98	41 33 47	* ** - 1,3/- 0,8 - 1,5/- 1,2 - 2,0/- 0,6	26 39 19	Teilweise bereits ab etwa 26. d bis 41. d nach Erstmessung Meßwertzunahme infolge Verbundstörung. Probe 9 nach 56 d zerbrochen (nur bei Probe 8 an Meßstellen) 1 bis 3 und 8; l ₃ , l ₄ > l ₁).
02 C2 K1/10 bis 12 vom 08.03.90	(Ausschalen nach 2 d, Erstmessung nach 4 d, Nachbehandlung 7 d) 78/15/7	1,0	20/65	- 0,73 - 0,60 - 0,40	28 36 14	* ** - 1,2/- 0,9 - 1,7/- 0,8 - 2,0/- 2,1	36 36 42	Teilweise bereits ab 28 d (Meßstellen 1, 2, 3 und 8) bzw. ab 42. d nach Erstmessung wieder Zunahme der Meßwerte einzelner Meßstrecken infolge Verbundstörung, ab etwa 58. d Meßwertzunahme (Probe 12); Probe 10 und 12: Meßstellen 1, 2, 3 und 8 (am Stopfende) l ₂ , l ₃ > l ₁ .
02 C2 K1/13 bis 15 vom 12.03.90	(Ausschalen und Erstmessung nach 2 d, Nachbehandlung 7 d) 78/15/7	4,5	20/65	- 0,75 - 0,75 - 0,54	19 19 56	* ** - 1,2/- 2,2 - 0,7/- 1,9 - 0,9/- 1,9	64/75 64/89 56/64	Bei allen Proben u. Meßstrecken: l ₁ , l ₂ , l ₃ > l ₀ ; nach 56/89 d wieder Zunahme der Meßwerte wegen beginnender Verbundstörung.
1.1 C2 K2/1 bis 3 vom 19.03.90	(Ausschalen und Erstmessung nach 2 d; Nachbehandlung bis 7. Tag) 85/10/5	1,0	20/99 (52 d) dann 20/65 (101 d)	+ 0,11 in 20/99 - 0,43 in 20/65	52 40	+ 0,23 in 20/99 - 2,1 in 20/65	52 158	Probe 1 und 3 ohne Verbundstörung, Probe 2 bald nach Umlagerung in 20/65 mit Verbundstörungen an allen Meßstrecken.

- 1) Meßstellen 1 bis 3 und 8 (am Stopfende)
2) Meßstellen 4 bis 7 (Seitenflächen, Hinterfläche)

- * bezogen auf l₀ (Erstmessung)
** bezogen auf l₁ (Zweitmessung)



Mittlere Verformungen der Meßstrecken über die Fuge bzw. auf den Steinen einzelner Doppelsteinprüfkörper-Flächen (siehe Anlage 79) bei Klimalagerung

- Anlage 81 -

Ergebnisse der Dehnungsmessungen an versiegelten Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und HGZ-Faserstopfmörtel mit einer Austrocknungsfläche

Bezeichnung Herstellung	HGZ-Bindemittel W/Z-Wert: 0,5 x _F : 0,05	Befeuchtungsdauer Steine (Tauchen)	Lagerklima	max. Schwindmaß Steine nach ... Tagen		max. Schwindmaß über Mörtelfuge an offener Fläche		Versuchsbesonderheiten *
				ε _s	Tage	ε _s	Tage	
-	-	h	°C/%	mm/m	d	mm/m	d	-
02 C2 K1/16 bis 18 vom 28.02.90 (Anlage 83)	85/10/5	1,0	20/65	0,5	51	1,8	81	Ausschalen, Aufkleben Meßmarken + Versiegeln: nach 2 d Erstmessung : nach 5 d Zweitmessung : nach 7 d tlw. Schwindabrisse vom Stein
02 C2 K1/19 und 20 vom 05.03.90	85/10/5	4,5	20/65	0,8	65	1,6	175	Ausschalen, Versiegeln : nach 2 d Aufkleben Meßmarken, Erstmessung : nach 9 d Zweitmessung : nach 14 d tlw. Schwindabrisse vom Stein
02 C2 K1/22 und 23 vom 08.03.90	78/15/7	1,0	20/65	0,4	18	2,3	70	Ausschalen : nach 2 d Aufkleben Meßmarken, Versiegeln + Erstmessung: nach 4 d Zweitmessung : nach 5 d tlw. Schwindabrisse vom Stein
02 C2 K1/25 bis 27 vom 12.03.90 (Anlage 84)	78/15/7	4,5	20/65	0,7	51	0,6 **	77	Ausschalen, Aufkleben Meßmarken, Versiegeln und Erstmessung : nach 2 d Zweitmessung : nach 7 d Schwindabrisse vom Stein
1.1 C2 K2/4 bis 6 vom 19.03.90 (Anlage 85)	85/10/5	1,0	1. 20/99 2. 20/65	0,4	78	1,4	161	Zuerst 57 d im Klima 20/99, danach 102 d im Klima 20/65 Ausschalen, Aufkleben Meßmarken, Versiegeln und Erstmessung : nach 2 d Zweitmessung : nach 7 d

* Wegen der beim Komplettieren der Prüfkörper entstehenden Belastungen wurden hierzu verschiedene Vorgehensweisen gewählt; bei der Nachbehandlung sind Abweichungen möglich.

** bezogen auf die Zweitmessung: etwa 1,1 mm/m

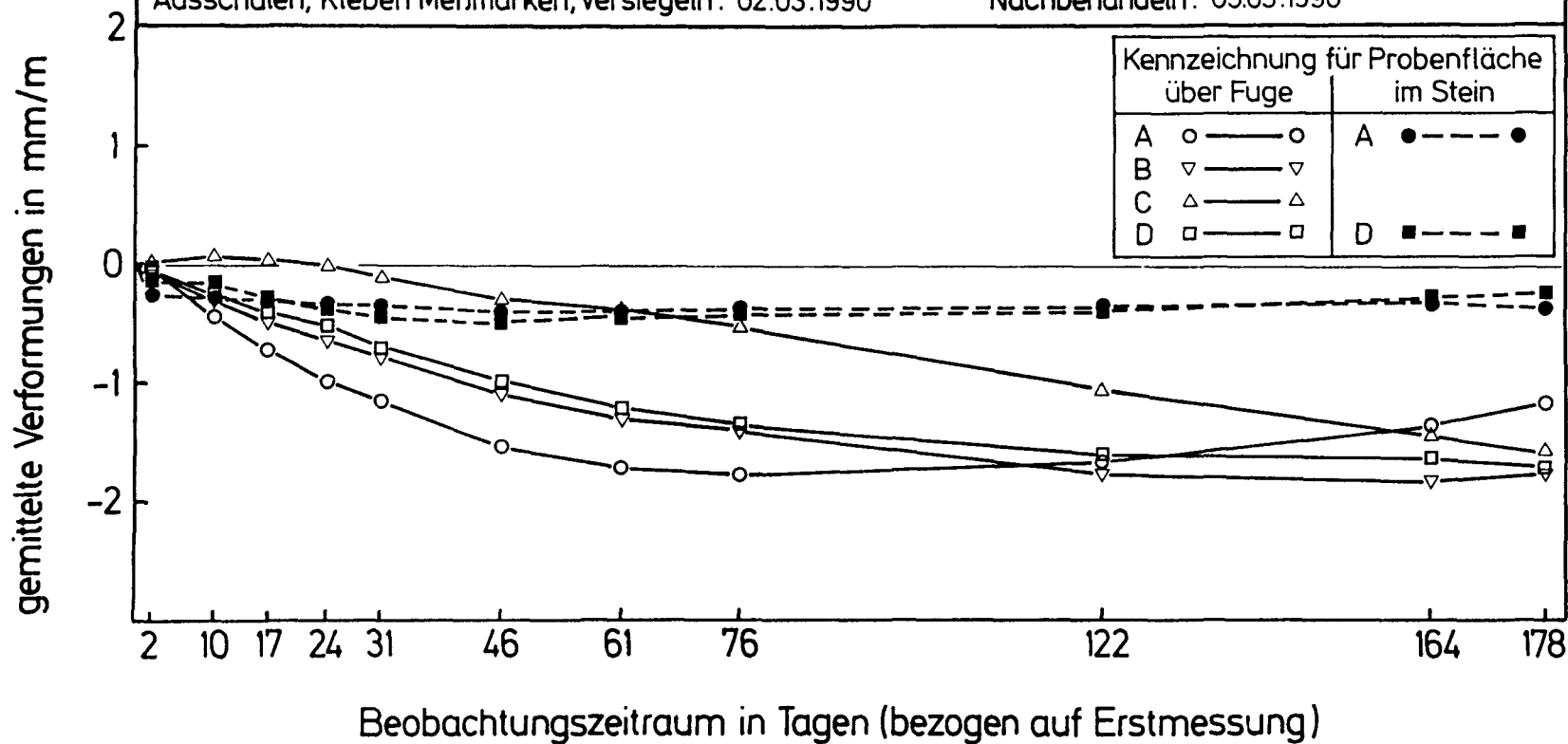
Nr. Zweistein-Prüfkörper	HGZ-Bindemittel	Wasser-Binde- mittel-Wert	Faser-Binde- mittel-Wert	Befeuchtungsdauer (Tauchen) der Steine	Klima
[-]	[-]	[-]	[-]	[h]	[-]
O2 C2 K1/ 16 bis 18 versiegelt	85/10/5	0,5	0,05	1,0	20/65

Hergestellt: 28.02.1990

Erstmessung: 05.03.1990

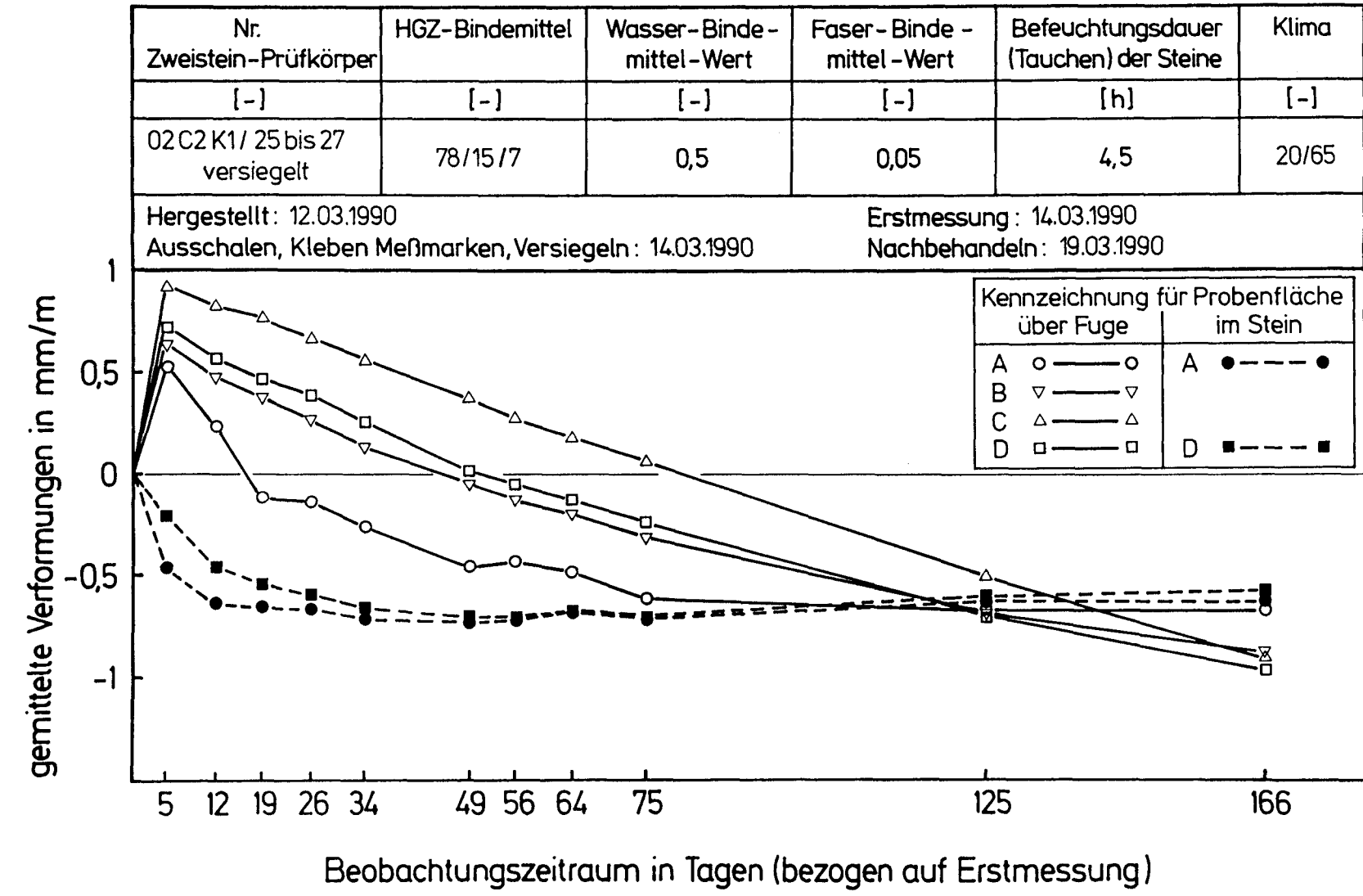
Ausschalen, Kleben Meßmarken, Versiegeln: 02.03.1990

Nachbehandeln: 05.03.1990



Mittlere Verformungen der Meßstrecken über die Fuge bzw. auf den Steinen einzelner Doppelsteinprüfkörper-Flächen (siehe Anlage 79) bei Klimalagerung

- Anlage 83 -



- Anlage 84 -

Mittlere Verformungen der Meßstrecken über die Fuge bzw. auf den Steinen einzelner Doppelsteinprüfkörper-Flächen (siehe Anlage 79) bei Klimalagerung

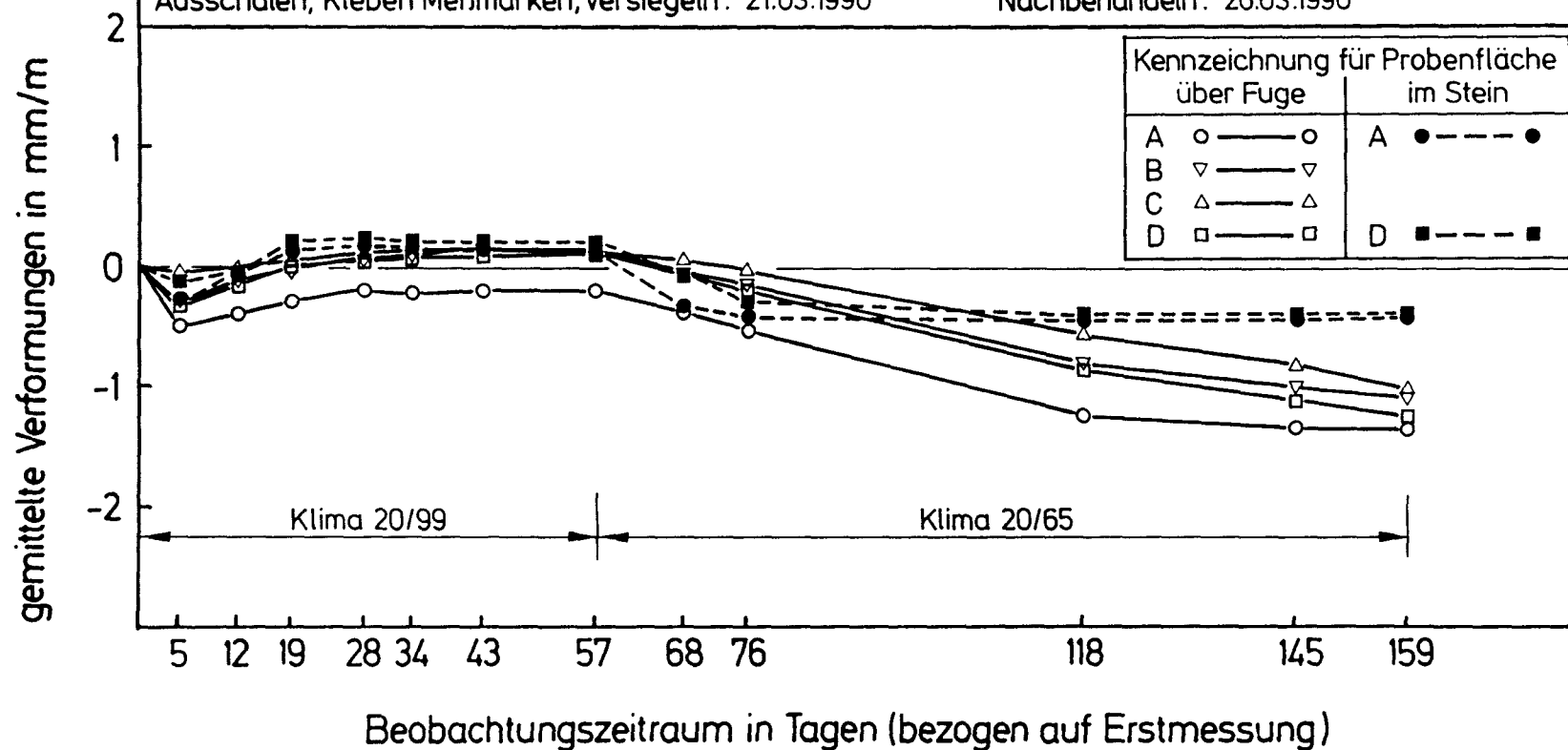
Nr. Zweistein-Prüfkörper	HGZ-Bindemittel	Wasser-Binde- mittel-Wert	Faser-Binde- mittel-Wert	Befeuchtungsdauer (Tauchen) der Steine	Klima
[-]	[-]	[-]	[-]	[h]	[-]
1.1 C2 K2/4 bis 6 versiegelt	85/10/5	0,5	0,05	1,0	20/99 20/65

Hergestellt: 19.03.1990

Erstmessung: 21.03.1990

Ausschalen, Kleben Meßmarken, Versiegeln: 21.03.1990

Nachbehandeln: 26.03.1990



Mittlere Verformungen der Meßstrecken über die Fuge bzw. auf den Steinen einzelner Doppelsteinprüfkörper-Flächen (siehe Anlage 79) bei Klimalagerung

- Anlage 85 -

Ergebnisse der Dehnungsmessungen an Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein und Zentrival-FM 10/20-Mörtel



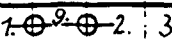
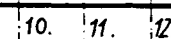
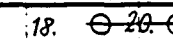
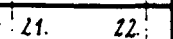
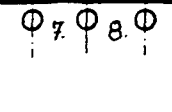
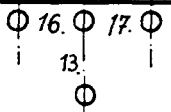
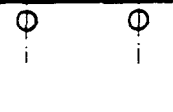
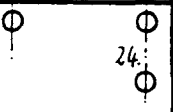
Bezeichnung Herstellung	Herstellart	Befeuchtungsdauer Steine (Tauchen)	Lagerklima	max. Dehnung Steine nach ... Tagen		max. Dehnung über Mörtelfuge nach ... Tagen		Versuchstechnische Besonderheiten
				ε	Tage	ε	Tage	
-	-	h	°C/%	mm/m	d	mm/m	d	-
03 C2 K1/1 bis 3 vom 27.06.90	manuell gestopft Zentrival FM 10 W* = 0,153	4,5	20/65	- 0,53	56	- 1,12	56	Messungen 56 d nach Erstmessung beendet; noch kein Gleichgewichtszustand
03 C2 K1/4 bis 6 vom 27.06.90	manuell gestopft Zentrival FM 10 W* = 0,153	4,5	20/99	- 0,07	28	- 0,07	28	Meßwerte 28 d nach Erstmessung konstant
04 C2 K1/1 K2/3 K2/4 vom 06.06.90	trockengespritzt Zentrival FM 20	4,5	20/65	- 0,74	61	- 0,72	61	Meßwerte 47 d bis 61 d nach Erstmessung unverändert; Messungen 61 d nach Erstmessung beendet
04 C2 K2/1 K2/2 K1/3 K1/4	trockengespritzt Zentrival FM 20 vom 06.06.90	4,5	20/99	+ 0,24	81	- 0,26	81	Meßwerte 14 bis 20 d nach Erstmessung konstant

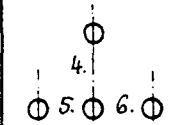
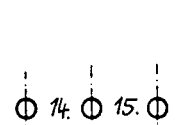
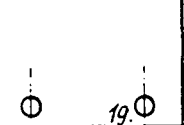
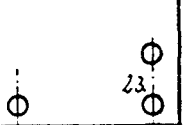
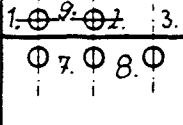
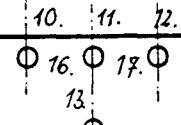
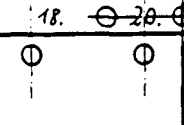
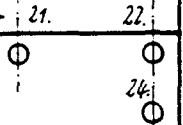



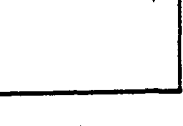
Ausschalen: 2 Tage nach Herstellung
 Erstmessung: 5 Tage nach Herstellung (Serie 03)
 6 Tage nach Herstellung (Serie 04)
 Nachbehandlung: bis 7. Tag nach Herstellung

Vorzeichen "-" = Schwinden
 Vorzeichen "+" = Quellen
 W* = Wasser-Trockenmörtel-Verhältnis

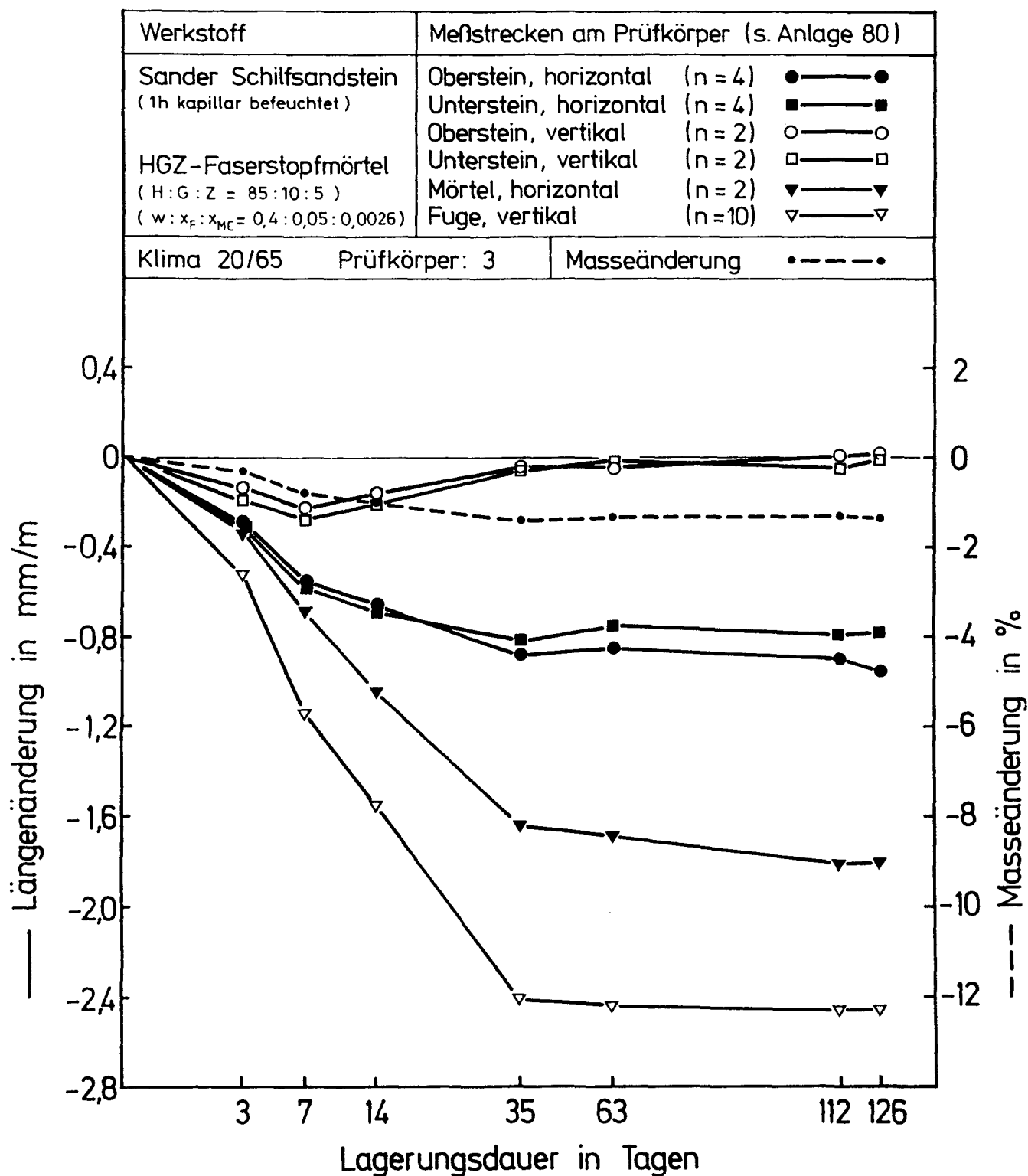
- Anlage 87 -

Bezeichnung der Meßstellen an Doppelstein-Prüfkörpern aus MC-modifiziertem HGZ-Faserstopfmörtel und Sander Schilfsandstein bzw. Rüthener Grünsandstein zur Bestimmung hygrischer Dehnungen und Auswertung der Ergebnisse

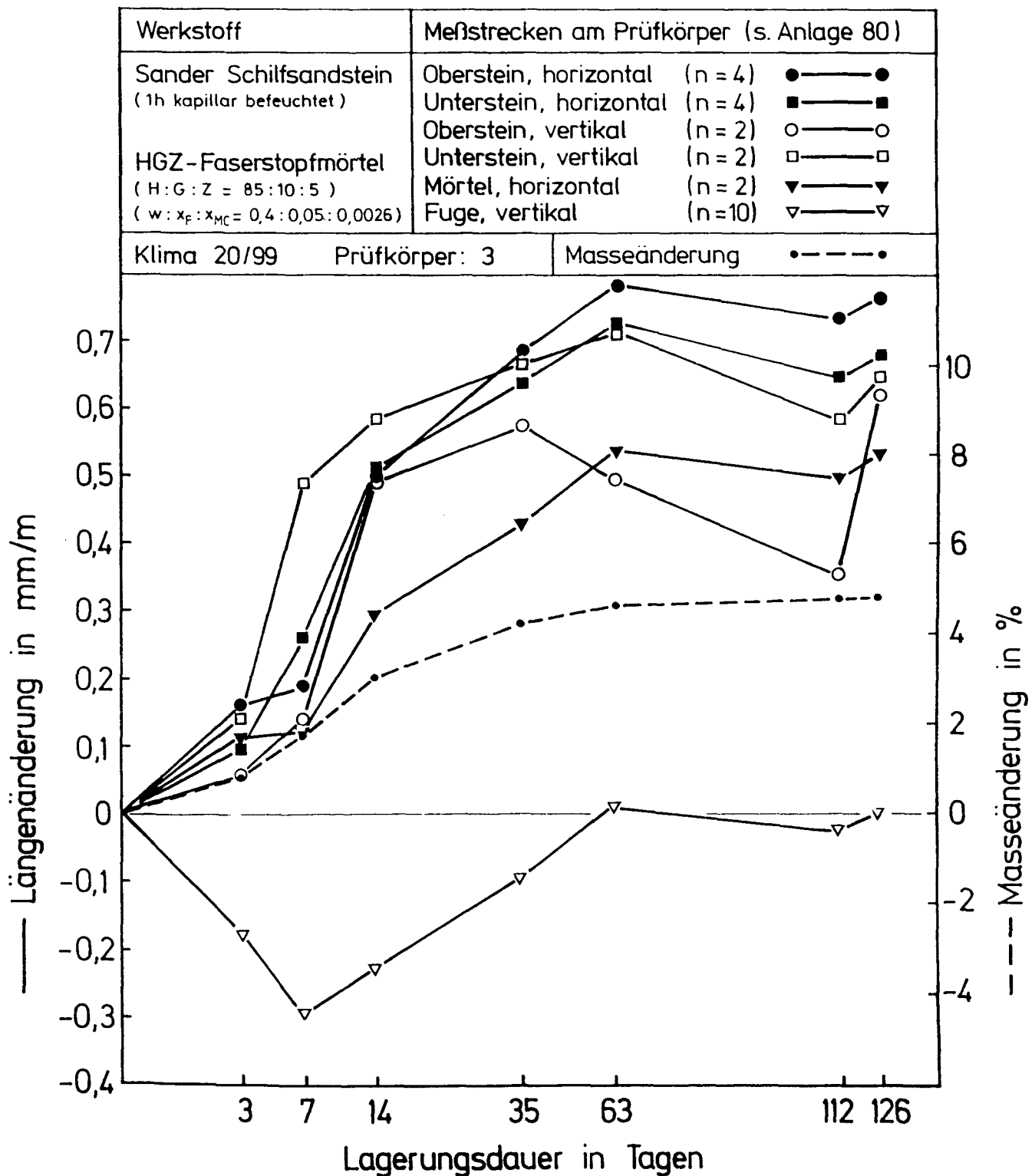
	Klima 20/65 Steinart : Rütthener Grünsandstein Meßtermin : Tage nach Erstmessung Massenänderung :- % (V= %) (n = 3) (mm/m)			
	Vorderfläche	Seitenfläche 1	Hinterfläche	Seitenfläche 2
Oberstein				
Mörtel				
Unterstein				
	Längenänderungen (Mittelwerte):			
	Oberstein		Unterstein	
	Steine, horizontal (n = 4)			
	Steine, vertikal (n = 2)			
	Mörtel, horizontal (n = 2)			
	Fuge, vertikal (n = 10)			
	Mörtel, vertikal			

	Klima 20/99 Steinart : Rütthener Grünsandstein Meßtermin : Tage nach Erstmessung Massenänderung :+ % (V= %) (n = 3) (mm/m)			
	Vorderfläche	Seitenfläche 1	Hinterfläche	Seitenfläche 2
Oberstein				
Mörtel				
Unterstein				
	Längenänderungen (Mittelwerte): Oberstein Unterstein			
	Steine, horizontal (n = 4) Steine, vertikal (n = 2)			
	Mörtel, horizontal (n = 2) Fuge, vertikal (n = 10) Mörtel, vertikal			

- Anlage 88 -

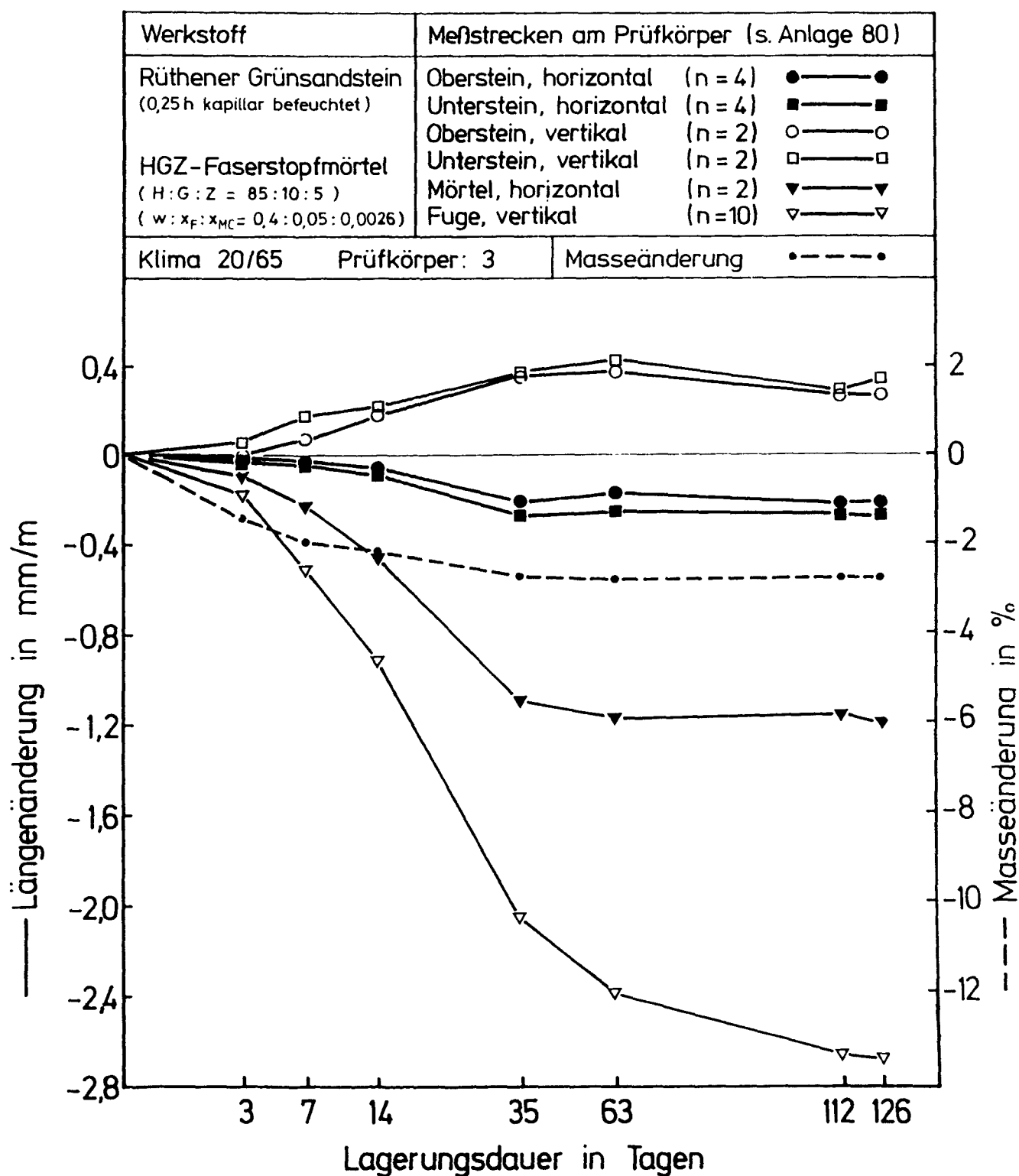


Längenänderung verschiedener Meßstrecken an Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein sowie ihre Masseänderung im Klima 20/65

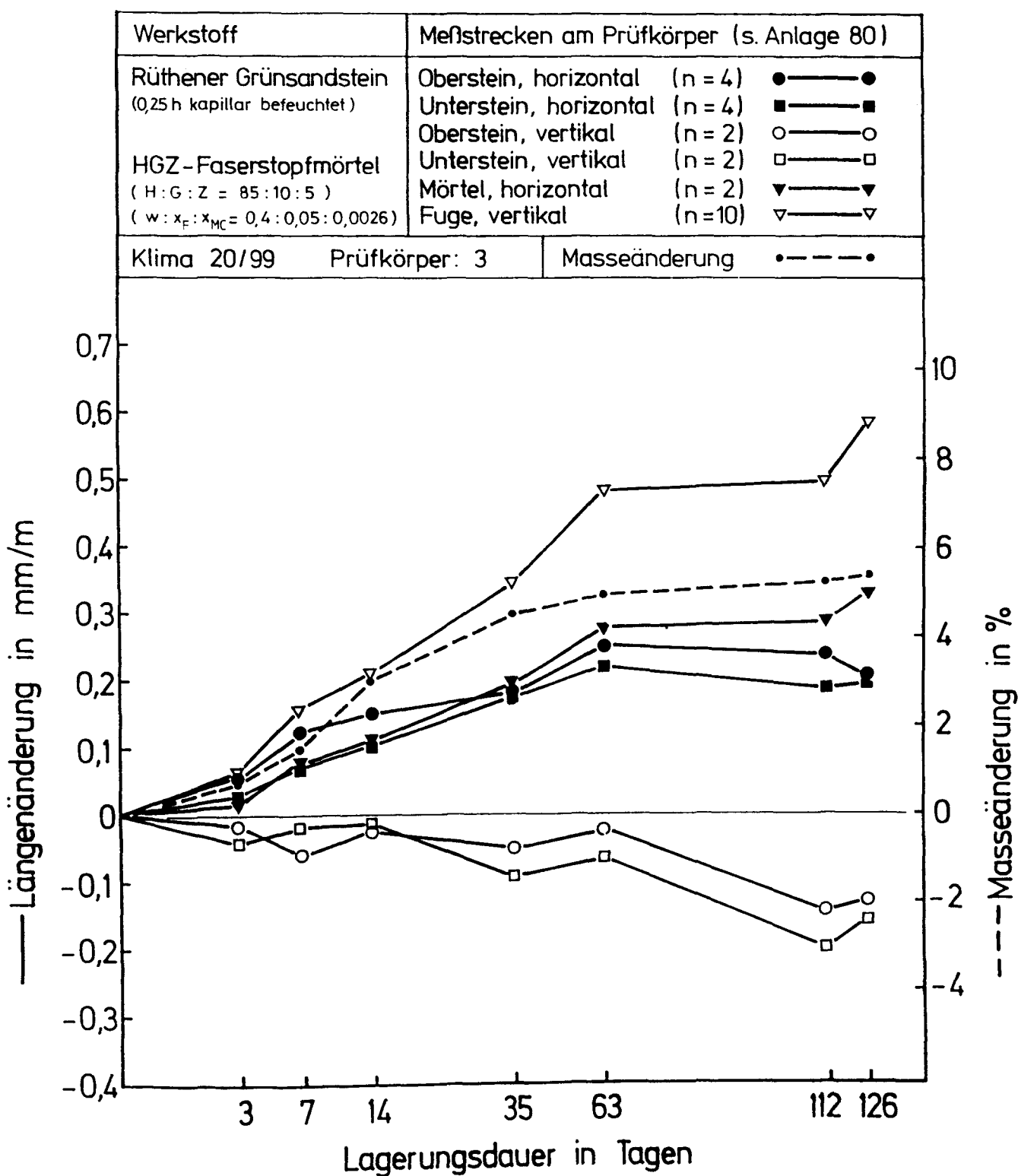


Längenänderung verschiedener Meßstrecken an Doppelstein-Prüfkörpern aus Sander Schilfsandstein sowie ihre Masseänderung im Klima 20/99

- Anlage 90 -



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an Doppelstein-Prüfkörpern aus Rüthener Grünsandstein sowie ihre Masseänderung im Klima 20/65



Längenänderung verschiedener Meßstrecken an Doppelstein-Prüfkörpern aus Rüthener Grünsandstein sowie ihre Masseänderung im Klima 20/99